

“F.C. - SAM”

Afstudeerverslag



J. van Beek

"F.C. - SAM"

Afstudeerverslag

(stageperiode 15-01-2003 tot 06-06-2003)

Abstract

Dit "afstudeerverslag" beschrijft de implementatie van brandstofcellen in een hybride voertuig, genaamd "SAM", welke standaard alléén met accu's wordt aangedreven. Aanvankelijk is er onderzoek gedaan naar bestaande literatuur en meetdata, waaruit verschillende regelstrategieën naar voren zijn gekomen. Ook zijn er metingen gedaan om vast te stellen of het haalbaar is bepaalde systemen in de "SAM" onder te brengen, gezien de omgevingscondities waarin deze apparatuur moet opereren. Dit verslag zal dan ook uitvoerig ingaan op de bevindingen die hieruit voortgekomen zijn ...

Jeroen van Beek
E.C.N. (Energy research Centre of the Netherlands)
Dep.: T.S.& C. (Technology Services & Consultancy)
Westerduinweg 3
1755 LE Petten (The Netherlands)
Tel.: +31 224 564258
E-mail.: vanBeek@ECN.nl

Voor akkoord stagebegeleider opleiding:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'J. van Beek', enclosed in a dotted rectangular box.

Voor akkoord stagebegeleider E.C.N.:

Petten, 19 – 05 – 2003

Stagebegeleider bedrijf: dhr. Ing. A.J. Ruiter ("E.C.N.")
Stagebegeleidend docent: dhr Drs. Ir. C. van der Vlugt ("Hogeschool INHOLLAND Haarlem")



“ ... Yes, my friends, I believe that water will one day be employed as fuel, that hydrogen and oxygen which constitute it, used singly or together, will furnish an inexhaustible source of heat and light of an intensity, of which coal is not capable ... ”

Jules Verne (Frans schrijver, Nantes 1828 – Amiens 1905)

De Franse schrijver Jules Verne wordt beschouwd als een van de eerste science-fictionschrijvers. Hij schreef zeer populaire avonturenverhalen die soms profetisch bleken te zijn. Hij voorspelde met levendige fantasie nauwkeurig de moderne technologische uitvindingen, zoals ruimteschepen, geleide raketten, luchtvaart, toepassing van waterstof als brandstof en onderzeeërs. In “Vingt mille lieues sous les mers” (1870), een van zijn beroemdste boeken, vertelt Verne het verhaal van een verdwaasde gezagvoerder van een onderzeeër, kapitein Nemo. In andere werken neemt Verne zijn lezers mee naar de ruimte en naar de andere kant van de aarde, zoals wanneer Phileas Fogg een reis rond de wereld maakt om een weddenschap te winnen in “Le tour du monde” en quatre-vingts jours (1873). Zijn geboorteplaats was in die tijd nog vol herinneringen aan het Franse koloniale rijk. De sfeer van een verschild verlangen naar verre gebieden en avontuurlijke reizen is altijd een belangrijke component van zijn boeken gebleven. Nadat Jules Verne in 1853 in de rechten was gepromoveerd, eigerde hij de procureurspraktijk van zijn vader over te nemen. De ongebondenheid van het kunstenaarsbestaan werd in hem wakker en hij aanvaardde liever het bescheiden baantje van secretaris van het “Théâtre Lyrique”. Na zijn huwelijk stortte hij zich in het avontuur van de effectenmakelaardij. Jules Verne, een man die zijn tijd ver vooruit was, de grote ziener, die met zijn voor die tijd wonderbaarlijke papieren projecten laaiende geestdrift verwerkte en vele pioniers in latere dagen tot grote daden inspireerde, de grote schrijver tevens die door zijn boeken miljoenen vaders en zonen in de gehele wereld wist en nog voortdurend weet te boeien.

Voorwoord

In de laatste fase van de opleiding luchtvaarttechnologie aan de "Hogeschool INHOLLAND Haarlem" dient er, gedurende een stageperiode van c.a. vijf maanden, een afstudeeropdracht te worden voltooid bij een bedrijf naar keuze. In dit geval is dat "Energie - onderzoek Centrum Nederland" (E.C.N.) in Petten. Deze afstudeeropdracht heeft als doel: *"het in de praktijk brengen van techniek op een integrale wijze"*. Hierbij dient er zelfstandig onderzoek te worden gedaan op een manier die aansluit bij de opgedane kennis en vaardigheden binnen de opleiding.

Gedurende de stageperiode behoort men achtereenvolgens een "plan van aanpak" (P.V.A.), twee "tussenrapportages" en een "conceptverslag" te maken, met hieruit voortvloeiend het "eindverslag". Daar de eerste vier verslagen reeds afgerond zijn rest ons nu dit "afstudeerverslag", waarvan u nu een exemplaar in handen heeft. Twee weken na de inleverdatum van dit verslag zal ook het "eindverslag" zijn voltooiing vinden, hetwelk inhoudelijk nagenoeg gelijk zal zijn.

Dit "afstudeerverslag" dient ter afsluiting van de stageperiode bij E.C.N. waarin werkzaamheden zijn verricht ten bate van het "F.C. (FuelCell) – SAM" project. Het project heeft voornamelijk als doel de bedrijfsactiviteiten meer naar buiten toe uit te dragen, en draagt tevens bij aan kennis-vergroting binnen E.C.N. Dit verslag is bedoeld voor de begeleidende personen binnen de afstudeeropdracht, maar kan ook een belangrijke bron van informatie zijn voor diegene die zich in de toekomst gaat bezighouden met soortgelijke (vervolg-)projecten bij E.C.N..

De afstudeerstage bij E.C.N. is een zéér leerzame ervaring geweest, en heeft achterafgezien een ietwat bredere 'insteek' gekregen dan alleen regeltechnische zaken, zoals aanvankelijk werd verondersteld. Naast de verschillende regelstrategieën die zijn ontwikkeld bleek er nog voldoende tijd over om andere theoretische en praktische zaken van het "F.C. – SAM" project te onderzoeken. Hiermee is het project in zijn totaliteit verder gevorderd, en kan men spoedig overgaan tot de installatie van brandstofcellen in het voertuig.

Tot slot ben ik mijn dank verschuldigd aan dhr. Ing. A.J. Ruiter; dhr. Drs. Ir. C. van der Vlugt; dhr. Ir. M. Kardolus; dhr. Drs. R.K.A.M. Mallant; dhr. Ir. D.A.J. Wouters; dhr. Ir. P.C. van der Laag; dhr. B. Visser; dhr. J. Secker; dhr. Prof. Dr. Ir. B. Plomp; dhr. S. de Munck; dhr. Ing. M. Hoede; dhr. Dr. W. Planje en dhr. Ing. P. Rooij voor hun waardevolle adviezen, aanvullingen en praktische ondersteuning.

Voor opbouwende kritiek en suggesties houd ik mij uiteraard aanbevolen.

J. van Beek Petten, 19 – 05 – 2003

Samenvatting

Omdat, in tegenstelling tot wat heden ten dage in de auto-industrie veelvuldig het geval is, door ECN geen hybride voertuigen worden ontwikkeld, is voor de implementatie van brandstofcellen in het hybride voertuig "SAM" aangeschaft. De energie voor tractie wordt bij dit voertuig volledig onttrokken aan accu's, waardoor de actieradius relatief klein is ten opzichte van de uitvoering met brandstofcel, zoals E.C.N. deze gaat ontwikkelen (met een nieuw accupakket waarbij alléén de capaciteit is gehalveerd t.o.v. van het originele accupakket).

Een brandstofcel is een elektrochemisch apparaat waarin een oxidator (zuurstof) in combinatie met 'brandstof' een elektronenstroom genereert, waarbij tevens een deel van de energie door dissipatie verloren gaat. Met andere woorden: waterstof en zuurstof aan de ingang, geeft stroom en warmte aan de uitgang, ook zal er hierbij watervorming ontstaan aan de uitgang. Een brandstofcel (FuelCell) is zeer efficiënt, maakt geen geluid en belast het milieu niet. In het proces van de brandstofcel leveren brandstofatomen elektronen aan de zuurstofatomen. De koolstof én waterstofatomen worden geoxideerd, en de zuurstof gereduceerd. In een brandstofcel zijn de oxidatie en de reductie reacties gescheiden door een elektrolyt. Omdat de oxidatie én de reductie plaatsvinden in een zeer kleine omgeving, is de ladingoverdracht vrijwel direct.

Door het brandstofcel systeem wordt een spanning geleverd welke niet binnen de 'range' valt van het hiermee samenwerkende accupakket. Hiertoe is een "DC / DC – (boost-)converter" aangeschaft die het spanningsniveau van de brandstofcel (F.C.) tot het spanningsniveau van het accupakket moet 'boosten'. Het 'boosten' van de spanning wordt gerealiseerd door (geschakeld) energie in de spoel van de boostconverter op te slaan en deze vervolgens samen met de bronspanning aan de uitgang af te geven. De spoel bepaald uiteindelijk de grootte van de rimpelstroom; deze moet aangepast worden aan de eis van de brandstofcel. Door het toepassen van een z.g.n. current-mode control is het mogelijk om het vermogen van de brandstofcel te beperken tot een waarde van c.a. 8 KW (max.), waarmee de ingangsstroom van de converter naar een gewenste waarde wordt geregeld. Zo wordt tegemoet gekomen aan het werkgebied van de brandstofcel.

In de originele situatie van de "SAM" worden er 14 "Hawker" (type "Genesis") accu's á 26 Ah bij 12 V in de 'spine' ondergebracht, wat zal resulteren in een totale spanning van 168 V nominaal bij serieschakeling.

De bidirectionele drie fase tractie "DC / AC – converter", die standaard in de "SAM" is ondergebracht, berust op het principe dat een gelijkstroom in een drie fase wisselstroom omgezet kan worden door, met een faseverschil van 120° beurtelings drie – meestal pulsbreedte gestuurde – afzonderlijke schakelingen te bekrachtigen, om zo een spanning te verkrijgen welke sterk lijkt op een drie fase wisselspanning.

Om deze hele 'keten' van voornoemde deelsystemen aan te sturen zijn er tijdens de stage een drietal regelstrategieën ontwikkeld, te weten:

- 1° Regelconcept d.m.v. "DC / DC – converter" model;
- 2° Regelconcept d.m.v. vermogensbalans model;
- 3° Regelconcept d.m.v. accuspanning model.

Het eerste regelconcept zal ons een regelstrategie laten zien waarmee wordt gepoogd de werkelijke "DC / DC – converter" synchroon te laten verlopen met een software model van "Simulink". Het tweede alternatief laat ons een regelstrategie zien waarbij er gebruik wordt gemaakt van zoveel mogelijk systeemparameters, die tezamen in een vermogensbalans resulteren. Het derde, en tevens laatste, regelconcept laat ons een regeling zien waarbij uitsluitend van accuspanning en stroom gebruik gemaakt zal worden voor de regeling van het systeem.

Ook zijn er tijdens de stage metingen verricht waaruit interessante eigenschappen van de "SAM" naar voren gekomen zijn. Van bovenstaande zaken, en meer, wordt in dit verslag het een en ander toegelicht.

Inhoudsopgave

Hoofdstuk / Paragraaf - Onderwerp	Pag.
Voorwoord	3
Samenvatting	4
Inhoudsopgave	5
Symbolenlijst / Notaties	6
Verklarende woordenlijst	7
Hoofdstuk – 1 Inleiding	8
Hoofdstuk – 2 E.C.N. algemeen	9
§ 2.1 Waarom energieonderzoek?	9
§ 2.2 Energieonderzoek bij E.C.N.	9
§ 2.3 Missie ECN	9
§ 2.4 Unit E.C.N. Brandstof Cel Technologie (B.C.T.)	10
§ 2.5 Unit E.C.N. Technologische Services & Consultancy (T.S & C)	10
Hoofdstuk – 3 De afstudeeropdracht	11
§ 3.1 Originele concept aandrijving "SAM"	11
§ 3.2 E.C.N. - concept aandrijving "SAM"	12
Hoofdstuk – 4 De brandstofcel (FuelCell) algemeen	14
§ 4.1 Werking van een P.E.M.F.C.	14
§ 4.2 Chemische proces van de brandstofcel (P.E.M.F.C.)	14
Hoofdstuk – 5 Het brandstofcel systeem algemeen	17
§ 5.1 Het H ₂ - circuit	18
§ 5.2 Het koelcircuit	19
§ 5.3 Het luchtcircuit	20
§ 5.4 Appendages van het brandstofcel systeem	20
§ 5.5 Overige systeemeisen m.b.t. de 'spine' van de "SAM"	21
Hoofdstuk – 6 De "DC / DC – converter" algemeen	22
§ 6.1 Werking van de elektrische "Boost Converter" koppeling	22
§ 6.3 "Puls Width Modulator" (P.W.M.)	25
§ 6.4 Beveiligingen in de "Boost Converter" koppeling	27
§ 6.5 Metingen aan de "DC / DC – converter"	28
Hoofdstuk – 7 Overige systemen v/d (originele) "SAM"	29
§ 7.1 Het accupakket van de "SAM"	29
§ 7.2 De bidirectionele "DC / AC – converter" van de "SAM"	29
Hoofdstuk – 8 De drie regelstrategieën van de "SAM"	30
§ 8.1 Eerste regelconcept, d.m.v. "DC / DC – converter" model	31
§ 8.1.1 Modelleren van de accu	32
§ 8.1.2 Modelleren van de accu	33
§ 8.1.3 De "DC / DC boost – converter"	35
§ 8.1.4 "Setpoint control" van de "DC / DC – converter"	38
§ 8.1.5 Systeemgedrag "Converter" model en "SAM"	38
§ 8.1.6 Ondervonden problemen bij dit regelmodel	40
§ 8.2 Tweede regelconcept, d.m.v. vermogensbalansvergelijking	41
§ 8.2.1 Bepaling luchtstroomweerstandscoefficiënt van de "SAM"	42
§ 8.2.2 Regelmodel van de vermogensbalansvergelijking	45
§ 8.2.3 Extra alternatief voor vermogensbalansvergelijking regelmodel	50
§ 8.3 Derde regelconcept, d.m.v. accuspanning (voorkeur)	51
§ 8.3.3 Toepassing "dSpace" voor de regeling bij accuspanning	53
Hoofdstuk – 9 "SAM" met de "Fluke - datalogger"	55
Hoofdstuk – 10 "SAM" met de "F.C." & "MABX"	56
§ 10.1 De "MABX" toegepast als 'datalogger'	57
§ 10.1.1 Analoge conversiekastje	57
§ 10.1.2 De "Wago" module	58
§ 10.1.3 De "Micro AutoBoX" (MABX) van "dSpace"	59
§ 10.1.4 De laptop met "Control Desk" van "dSpace" toegepast bij de "MABX"	59
§ 10.2 Ondervindingen bij meting met de "MABX" in de "SAM"	60
§ 10.2.1 De acculader van de "SAM"	61
Hoofdstuk – 11 Meetdata onderzoek algemeen	62
§ 11.1 Karakteristieken van de "SAM"	62
§ 11.2 Meting temperaturen in de "SAM"	64
Hoofdstuk – 12 Slotwoord	66
Hoofdstuk – 13 Aanbevelingen	67
Hoofdstuk – 14 Conclusies	68
Literatuurlijst	69
Bijlagen	70
Bijlage – 1 Opdrachtoomschrijving + Eindtermen	71
§ B1.1 Doelstelling	71
§ B1.2 Probleemstelling	71
§ B1.3 Oude concept	71
§ B1.4 Nieuwe concept	72
§ B1.5 Projectactiviteiten	73
§ B1.6 Projectgrenzen en randvoorwaarden	74
§ B1.7 De producten	74
§ B1.8 Kwaliteitsbewaking van het project	75
§ B1.9 Kosten / baten	75
§ B1.10 Risicoanalyse	75
§ B1.11 Slotopmerking	76
§ B1.12 Strokenplanning en werkpakketten	76
§ B1.13 Eindtermen	76
§ B1.13 Prognose van de voortgang van het (FC)SAM project	76
§ B1.14 Strokenplanning	77
Bijlage – 2 SAM (Cree AG)	78
Factsheet Produkt	78

Symbolenlijst / Notaties

Symbol	Betekenis	Dimensie
A	Oppervlak	[m ³]
$a = \ddot{x}$	Acceleratie (versnelling)	[m/s/s of m/s ²]
C	Koolstof	[-]
C	Capaciteit	[F]
C _t	Capaciteit oscillator, voor τ	[F]
d/dt	Differentiequotiënt	[-]
F	Constante van "Faraday"	[≈ 96485]
H	Waterstof	[-]
I	Stroom	[A]
I _a	Accu stroom	[A]
I _f	Brandstofcel stroom	[A]
I _m	Motorstroom	[A]
i _o	Uitgangsstroom	[A]
I _r	Verlangde (required) stroom	[A]
i _s	Voedingsstroom	[A]
I _{sp-1}	Stroom setpoint "DC / AC – converter"	[V]
I _{sp-2}	Stroom setpoint "DC / DC – converter"	[V]
i _φ	Rimpelstroom	[A]
L	Zelfinductiecoëfficiënt	[H]
m	Massa	[Kg]
O	Zuurstof	[-]
P	Druk	[Pa]
$p = x$	Positie	[m]
R	(Belastings)weerstand	[R]
R _t	Weerstand oscillator, voor τ	[Ω]
s	laplace complexe variabele	[-]
T	Periodetijd	[s]
T	Temperatuur / Koppel	[°C] / [Nm]
T _{uit}	Deel - periode aan	[s]
T _{aan}	Deel – periode uit	[s]
U	Spanning	[V]
U _o	Uitgangsspanning	[V]
U _s	Voedingsspanning	[V]
U _φ	Rimpelspanning	[V]
U _a	Accuspanning	[V]
U _{sp-1}	Spanning setpoint "DC / AC – converter"	[V]
U _{sp-2}	Spanning setpoint "DC / DC – converter"	[V]
V	Volume	[m ³]
$v = \dot{x}$	Snelheid	[m/s]
Δx	Gaspedaal uitwijking	[m]
δ	Duty – cycle	[-]
Φ	Flow	[m ³ /s]
f	Frequentie	[Hz]
$\dot{m}$	Massastroom	[Kg/s]
μ	Wrijvingsweerstandcoëfficiënt wegdek	[-]
η of n	Performance (rendement of efficiëntie)	[%]
φ	Stroomrimpel	[A]
ω	Hoeksnelheid	[Rad/s]
ρ	Soortelijke massa	[Kg/m ³]
λ	Sociometrie	[-]

Verklarende woordenlijst

FC	FuelCell of brandstofcel (genereert uit H ₂ O een evenredige hoeveelheid stroom);
CREE	Creation Research Engineering ecology, producent van onderstaande SAM;
SAM	3 wielig elektrisch hybride voertuig van het Zwitserse CREE A.G. voor inbouw FC;
FCSAM	Zelfde scooter als boven, maar dan mét accupakket als buffer en FC als energiebron;
ECN	Energieonderzoek Centrum Nederland (Energy research Centre of the Netherlands);
RDW	Rijks Dienst voor Wegverkeer;
PEMFC	Proton Exchange Membrane FuelCell;
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell;
SOFC	Solid Oxide Fuel Cel;
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cel;
AFC	Alkaline Fuel Cel;
DMFC	Direct Methanol Fuel Cel;
DC	Direct Current (gelijkstroom);
AC	Alternative Current (wisselstroom);
MABX	Besturingsunit (vaak een soort van regeltechnisch PID controller);
DSPACE	Design Space (regeltechnische werkomgeving, vergelijkb. met Matlab en Labview);
QI	Quality Indicator (geleidbaarheid of permeabiliteitsensor);
TI	Temperature Indicator (temperatuursensor [thermokoppel] en controller);
TIC	Temperature Indicator and Controller;
FI	Flow Indicator (massastroom meter);
PFD	Process flow Diagram (of FC = Flow Chart of volgordediagram);
3D	3 Dimensionaal (x; y en z).
Stoichiometrie:	Mate van ‘overmaat’ (stochometrie van 2, d.w.z. 2 x zoveel lucht aanwezig dan nodig voor de reactie, vergelijkbaar met wat men in de autoindustrie een ‘te rijk mengsel’ noemt);
Stack:	Stapel (in dit geval vaak een serieschakeling / ‘stapel’ van brandstofcellen);
Performance:	Verhoudig tussen hetgeen men nuttig aan energie kan gebruiken in verhoudig tot wat men aan energie toevoerd (x 100 %). Wordt ook wel met efficiëncie of rendement (“ η ”) aangegeven.
Setpoint	Referentie spanning of stroom welke binnen een bepaalde range geregeld kan worden, waarmee een overeenkomstige systeemp parameter, binnen een andere range, aangestuurd wordt (volgens recht evenredig [meestal lineair] verloop).

Hoofdstuk – 1 Inleiding

Bij E.C.N. behoort de ontwikkeling van brandstofcellen, bij de afdeling "Brandstof Cel Technologie" (B.C.T.), tot de belangrijkste activiteiten op het gebied van energie innovatie. Aangezien tegenwoordig een groot deel van onderzoek en ontwikkeling van brandstofcellen in de auto-industrie plaatsvindt, is het niet meer dan logisch dat ook E.C.N. zich richt op het implementeren van brandstofcellen in voertuigen. Omdat in tegenstelling tot de auto-industrie het ontwikkelen van elektrische hybride voertuigen niet tot de bedrijfsactiviteiten van E.C.N. behoort, is ten behoeve van het project de zogenaamde "SAM" aangeschaft. Dit is een driewielig elektrisch voertuig gefabriceerd door het Zwitserse "Cree" ("Creation Research Engineering") A.G. De energie voor tractie wordt bij dit voertuig volledig onttrokken aan accu's, waardoor de actieradius relatief klein is ten opzichte van de uitvoering met brandstofcel, zoals E.C.N. deze gaat ontwikkelen.

In de brandstofcel zal waterstof en zuurstof worden omgezet in elektrische energie waarmee het aandrijfsysteem van het voertuig bekrachtigd kan worden. Hiermee is de energievoorziening duurzamer en milieuvriendelijker. De brandstofcel heeft echter als nadeel dat, door de sterk dalende spanning bij belasting, niet meer kan worden voldaan aan het vereiste spanningsniveau voor het bestaande aandrijfsysteem. Hierdoor is men genoodzaakt een elektrische interface ("DC / DC - converter") te ontwerpen, tussen brandstofcel en aandrijfsysteem, waarmee wél aan het gewenste spanningsniveau kan worden voldaan. De brandstofcel zal, gedurende bedrijf, maximaal 8 KW aan energie moeten kunnen leveren. Om piekbelastingen tijdens bedrijf (16 KW bij versnellen van het voertuig) 'op te vangen' wordt er gebruik gemaakt van een accu - buffer met hetzelfde spanningsniveau als het oorspronkelijke accupakket van de fabrikant, maar dan bij een lagere capaciteit. Uit metingen is namelijk gebleken dat men met de helft van de oorspronkelijke accucapaciteit kan volstaan, waardoor er kleinere accu's kunnen worden toegepast en er ruimte wordt gewonnen voor de brandstofcel (wordt in hoofdstuk 8 nader toegelicht).



Figuur 1 "SAM"

Voor de afstudeeropdracht was het aanvankelijk de bedoeling een "DC / DC converter" te ontwerpen, maar deze activiteit is - kort voor aanvang van de stage - uit handen gegeven aan een gerenommeerd elektrotechnisch bedrijf, genaamd: "Power Research Electronics" (P.R.E.) te Dorst. Hiermee is voor de afstudeerperiode méér mogelijkheid gecreëerd om (ook) andere activiteiten van het "SAM" project af te ronden, zoals het opstellen van regelmodellen en het uitvoeren van metingen. Ook zijn er verschillende componenten ontworpen, zoals een behuizing en een koellichaam voor de "DC / DC - converter" alsook een analoog conversiekastje voor data-acquisitie. Tevens is er meer tijd gekomen voor statistisch onderzoek van meetdata en het opstellen van conclusies en aanbevelingen.

In dit verslag zal uitvoerig op voornoemde zaken worden ingegaan, met hieraan voorafgaand een algemene introductie van het E.C.N. en de afdelingen van de stage.

Hoofdstuk – 2 E.C.N. algemeen

E.C.N. is momenteel het grootste onderzoeksinstituut in Nederland op energiegebied. Momenteel zijn er ongeveer 900 mensen bij E.C.N. werkzaam. E.C.N. is een instituut wat zich, in zijn meest algemene omschrijving, richt op het onderzoeken van alles wat met energie te maken heeft. Hierbij bewegen de onderzoekers zich in het overgangsgedebiet tussen het fundamentele onderzoek van universiteiten en de toepassing van kennis in de markt. Dit heeft een grote invloed op het leven van alledag. Zo bevinden zich bijvoorbeeld zonnecelstelsmen op daken van huizen en staan moderne windmolens in het veld te draaien dankzij technologie die is ontwikkeld door E.C.N.. Hiermee oefent het instituut een belangrijke functie uit voor de maatschappij van vandaag en morgen.

§ 2.1 Waarom energieonderzoek?

De laatste eeuwen is de vraag naar energie explosief gestegen. De benodigde energie werd voornamelijk opgewekt door verbranding van fossiele brandstoffen. Met de groei van het energiegebruik nam ook de vervuiling van bodem, lucht en water toe. Het meest recente en grootschalige probleem van deze vervuiling vormt de stijging van het CO₂-gehalte in de atmosfeer. De daarmee gepaard gaande klimaatveranderingen kunnen op termijn een serieuze bedreiging vormen voor het leven op aarde. Het vinden van een structurele oplossing voor dit probleem is daarom essentieel geworden. Dit is mogelijk door anders met energie om te gaan. Om hiervoor methoden te ontwikkelen is energieonderzoek dan ook nodig.

§ 2.2 Energieonderzoek bij E.C.N.

E.C.N. richt zich met het energieonderzoek op een duurzame, veilige, efficiënte, betrouwbare en milieuvriendelijke energievoorziening. In opdracht van overheid en bedrijfsleven ontwikkelt E.C.N. hiervoor kennis en technologieën. Hierbij worden drie basiselementen onderscheiden, namelijk:

- Het terugdringen van de energievraag door energiebesparing;
- Het opwekken van energie met duurzame energiebronnen en;
- Een efficiënt en schoon gebruik van fossiele brandstoffen.

Daarnaast voert E.C.N. ook onderzoek uit naar combinaties, toekomstmogelijkheden en economische achtergronden op energiegebied. Hierop gebaseerd is het onderzoek bij E.C.N. verdeeld over zeven prioriteitsgebieden:

- Beleidsstudies;
- Energie Efficiency in de Industrie;
- Duurzame Energie in de Gebouwde Omgeving;
- Zonne-energie;
- Windenergie;
- Biomassa;
- Schoon Fossiel.

Het nucleaire energieonderzoek wordt uitgevoerd door de "Nuclear Research and consultancy Group" (N.R.G.), een joint venture van E.C.N. en K.E.M.A.. Van de c.a. 900 mensen die in dienst zijn bij E.C.N. werkt ongeveer een derde deel van de medewerkers bij N.R.G..

§ 2.3 Missie ECN

Met energie-innovaties voor overheden en bedrijven wordt bij E.C.N. gewerkt aan een duurzame energievoorziening. Door onderzoek en ontwikkeling draagt E.C.N. bij aan een efficiënter gebruik van energie, een versnelde implementatie van vernieuwbare energie én een schonere aanwending van fossiele brandstoffen. Als kenniscentrum behoort E.C.N. in de betreffende prioriteitsgebieden tot de internationale top vijf. De werkzaamheden zijn gericht op technologieën en kennis die op een termijn van enkele jaren tot zelfs enkele decennia kunnen worden toegepast. E.C.N. slaat hiermee een brug tussen fundamenteel onderzoek aan universiteiten en de toepassing van deze kennis. Onderzoek vindt

plaats in een inspirerende, effectieve en op vernieuwing gerichte omgeving, waarbij zorg voor de medewerker en het milieu centraal staat.

§ 2.4 Unit E.C.N. Brandstof Cel Technologie (B.C.T.)

Bij unit B.C.T. worden met marktpartijen materialen, componenten, 'stacks', systemen en systeemcomponenten ontwikkeld voor stationaire en transport toepassingen van brandstofcellen. Hiermee levert de unit een bijdrage aan het overheidsbeleid dat gericht is op een transitie naar een duurzame energievoorziening. Brandstofcellen systemen zijn zowel in de huidige aardgas- als in een toekomstige waterstofeconomie inzetbaar. Daarbij wordt de emissie van luchtverontreiniging tot nul teruggebracht.

§ 2.5 Unit E.C.N. Technologische Services & Consultancy (T.S & C)

Unit Technologische Services & Consultancy (de afdeling van de stage) is dé technische ondersteunings- en ontwikkelingsgroep van E.C.N.. De groep ontwerpt, realiseert en instrumenteert experimentele installaties, prototypes en hightech componenten, doet aan materiaal onderzoek, verzorgt gegevensverwerking en gegevens-visualisatie en schrijft wetenschappelijke software. Deze groep ondersteunt hiermee niet alleen E.C.N. maar ook andere innovatieve instellingen en bedrijven. Het is de probleemoplosser "pur - sang" voor grensverleggende technologie. In het nu volgende hoofdstuk zal in het kort worden besproken (zie ook bijlage – 1 voor de beknopte samenvatting van het "Plan Van Aanpak" [P.V.A.]) wat, tijdens de stageperiode op deze afdeling, aan activiteiten zal worden ondernomen en wat de bedoeling is van de opdracht in zijn algemeenheid.

Hoofdstuk – 3 De afstudeeropdracht

Zoals reeds in het voorwoord is aangegeven heeft de afstudeerstage een ietwat andere wending gekregen dan eerst werd verondersteld. Aanvankelijk was het namelijk de bedoeling een 8 KW "DC / DC – converter" te ontwerpen en hieraan metingen te verrichten. Omdat het ontwerpen van de converter uit handen is gegeven aan "Power Research Electronics" (P.R.E.) is er zo meer mogelijkheid gecreëerd om onderzoek te doen, en praktische zaken in goede banen te leiden. De afstudeeropdracht ansich is hierdoor een stuk groter van omvang geworden maar ook een stuk uitdagender geworden.

De afstudeeropdrachtoomschrijving zoals in het P.V.A. is omschreven is qua inhoud (zie bijlage – 1), voor wat betreft de verschillende deelactiviteiten (strokenplanning), niet veel veranderd. Onderstaande strokenplanning laat ons het werkelijke verloop van de stageperiode zoals deze de afgelopen weken is verlopen.

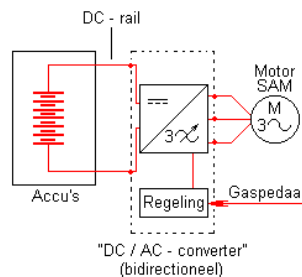


Figuur 2 Verloop van de stageperiode in de vorm van een strokenplanning

Teneinde begrip te krijgen in de aandrijving van de "SAM" zal in de nu volgende paragrafen worden ingegaan op het originele concept van de aandrijving van de "SAM", alsook het nieuwe concept waar de afstudeeropdracht zich in zijn geheel op toespitst.

§ 3.1 Originele concept aandrijving "SAM"

In de onderstaande figuur is het originele aandrijfconcept vereenvoudigd weergegeven.



Figuur 3 "Originele concept aandrijving SAM"

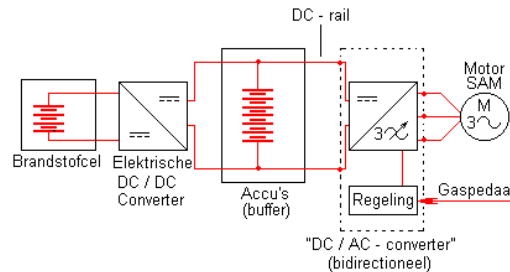
Door een aansturing van de bidirectionele "DC / AC – converter" door middel van het gaspedaal, zal er vermogen worden onttrokken uit het accupakket. De elektromotor van de "SAM" is een zogenaamde drie fase permanente magneet (tractie -) motor. De aansturing van de converter geschiedt door middel van een stroomsetpoint, welke gevarieerd wordt door verdraaiing van een lineaire potentiometer die aan de as van het gaspedaal zit bevestigd. Het stroomsetpoint is hierbij evenredig met de momentane stroomvraag, welke – tot redelijke benadering – overeenkomt met de momentane vermogensvraag (accuspanning constant verondersteld). De 'verplaatsing' $[\Delta x(t)]$ van het gaspedaal is hiermee, tot plausibele benadering, een 'maat' voor de vermogensvraag op dat tijdstip.

Op het moment dat het gaspedaal wordt 'losgelaten' zal de motor als generator dienst doen en zijn opgewekte energie terug gaan voeren naar het accupakket. Voorwaarde hierbij is wel dat het rempedaal ingetrapt moet zijn omdat men anders niet in de gelegenheid is de "SAM" te laten 'uitrollen'. Mechanisch remmen en 'regeneratief' remmen zijn dus aan elkaar gekoppeld, en dit ervaart men ook zowaar als men de "SAM" bestuurd.

N.B.: De "DC / AC – converter" en de tractiemotor zijn vloeistof (glycol) gekoeld, hierover zal later in dit verslag meer worden toegelicht.

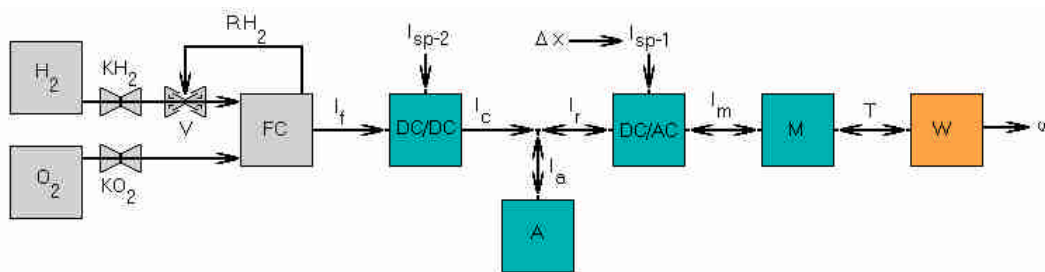
§ 3.2 E.C.N. - concept aandrijving "SAM"

In de onderstaande figuur is het E.C.N. aandrijfconcept vereenvoudigd weergegeven.



Figuur 4 "E.C.N. concept aandrijving SAM"

Door bovenstaande schema in een wat meer modulair - blokschematische voorstelling weer te geven kunnen we ons wat beter een voorstelling maken van de onderlinge aansturing / beïnvloeding van de verschillende deelsystemen:



Figuur 5 "E.C.N. concept aandrijving SAM blokschematisch"

De afkortingen in de verschillende blokken zijn als volgt te definiëren.

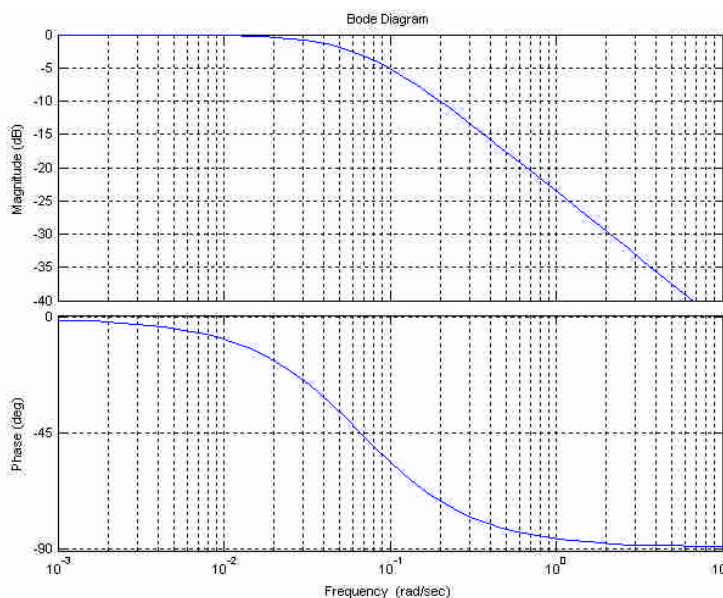
- H₂ en O₂: waterstof (gasfles) en zuurstof (middels compressorlucht c.a. 21 %);
- F.C.: fuelcell (brandstofcel) systeem;
- DC/DC & DC/AC gelijkstroom converter en gelijk / wisselstroom (bidirectionele) converter;
- A, M en W blokken van resp. accu, motor en wiel (aandrijving van de "SAM").

In dit blokschema is, indien we het geheel uitsluitend op stroomsturing bekijken, een onderlinge afhankelijkheid te vinden die we als volgt kunnen samenvatten:

$$\begin{aligned}
 &\Rightarrow \omega = f(T) \\
 &\Rightarrow T = f(I_m) \\
 &\Rightarrow I_m = f(I_{sp-1}) \\
 &\Rightarrow I_{sp-1} = f(\Delta x) \\
 &\Rightarrow I_r = f(I_{sp-1}) \\
 &\Rightarrow I_{sp-2} = f(I_r - I_a) \\
 &\Rightarrow I_f = f(I_{sp-2}) \\
 &\Rightarrow \Phi_{KO2} = f(I_f) \\
 &\Rightarrow \Phi_{KH2} = f(\Phi_{KO2}) \\
 &\Rightarrow \Phi_v = f(\Phi_{KH2})
 \end{aligned}$$

In het kort zou men kunnen stellen dat de gewenste hoeksnelheid (ω) het gevolg is van het motorkoppel of torsiemoment (T) wat op de achterwielaandrijving wordt 'aangebracht'. Dit motorkoppel is weer afhankelijk van de motorstroom (I_m) aangeboden door de "DC / AC – converter", en deze is afhankelijk van het "setpoint" (I_{sp-1}). Dit stroom - "setpoint" is afhankelijk van de mate waarin het gaspedaal van de "SAM" zal worden ingetrapt (Δx).

Hieruit volgt een bepaalde benodigde stroom die, in de tijd dat de F.C. deze nog niet beschikbaar heeft, tijdelijk door het accupakket (A) zal worden geleverd. De stroom die zal worden geleverd wordt gemeten, en wordt vrijwel direct 'vertaald' in een setpoint voor de H_2 en O_2 regelklep (KH_2 resp. KO_2). Tevens zal dit setpoint worden verhoogd met de stroomvraag die nodig is om het tekort aan "State Of Charge" (S.O.C. of ladingstoestand) van het accupakket aan te vullen. Met een 'te lage' S.O.C. wordt bedoeld dat de ladingstoestand van de accu een dusdanig niveau bereikt heeft dat deze onder de nominaal vereiste accuspanning van 12 V zal dalen (totaal 168 V), waarover later in dit verslag meer... Het setpoint voor de regelkleppen zal tevens in een stroom,- dan wel spanning – 'setpoint' voor de "DC / DC – converter" worden 'vertaald', met een vertraging die synchroon verloopt aan de traagheid van de F.C. welke voornamelijk wordt bepaald door de 'opslingercurve' van de compressor. Uit recentelijke metingen is gebleken dat het gedrag van de brandstofcel is voor te stellen als een $1 / (\tau \cdot s + 1)$ functie in het complexe "laplace – frequentiedomein" waarbij de τ – tijd (ook wel R.C. - tijd of tijdsconstante), afhankelijk van de grootte van de brandstofcel, gebruikelijk zal variëren tussen de 1 en de 30. Voor het begrip wordt in dit verslag, mede wegens gebrek aan beter, een tijdsconstante van 15 sec. voorlopig als aannemelijk verondersteld. Een karakteristiek gedrag voor de brandstofcel kan hiermee in een bodediagram als volgt worden vastgesteld, waarbij het "– 3 dB punt" (bij een fasehoek van 45°) zich laat vinden bij een hoeksnelheid van: $\omega \approx 67$ [rad/s].



Figuur 6

Karakteristiek verloop van het gedrag van een brandstofcel in de vorm van een bodediagram.

Bovenstaande concept en andere zaken in acht nemende zou de afstudeeropdracht zich in hoofdzaak toespitsen op het ontwerpen van regelstrategieën voor het brandstofcelsysteem van "SAM". Ook zou er in de tussentijd veelvuldig overleg gepleegd moeten worden en voor "feedback" moeten worden gezorgd; ook praktische zaken als ontwerpen van deelsysteemcomponenten en bestellen van producten bleek hierbij onontbeerlijk. Van dit alles zal verslag worden uitgebracht, in de vorm van dit conceptverslag en het hieruit voortkomende afstudeerverslag twee weken hierna.

In het nu volgende hoofdstuk zal de brandstofcel, als deelsysteem van de "SAM", nader worden besproken. Hierbij wordt gepoogd op eenvoudige, doch doeltreffende wijze de werking van de brandstofcel te beschrijven (we beginnen bij het beschrijven van de brandstofcel om hiermee het regelmodel van links naar rechts te doorlopen, en hiermee overzichtelijkheid te waarborgen).

Hoofdstuk – 4 De brandstofcel (FuelCell) algemeen

Een brandstofcel is een elektrochemisch apparaat waarin een oxidator (zuurstof) in combinatie met 'brandstof' een elektronenstroom genereert, waarbij tevens een deel van de energie door dissipatie verloren gaat. Met andere woorden: waterstof en zuurstof aan de ingang, geeft stroom en warmte aan de uitgang, ook zal er hierbij watervorming ontstaan aan de uitgang.

Een brandstofcel (FuelCell) is zeer efficiënt, maakt geen geluid en belast het milieu niet. In het proces van de brandstofcel leveren brandstofatomen elektronen aan de zuurstofatomen. De koolstof en waterstofatomen worden geoxideerd, en de zuurstof gereduceerd. In een brandstofcel zijn de oxidatie en de reductie reacties gescheiden door een elektrolyt. Omdat de oxidatie én de reductie plaatsvinden in een zéér kleine omgeving, is de ladingoverdracht vrijwel direct.

Omdat waterstof in zijn zuivere vorm niet in de natuur voorkomt, moet men deze zelf maken. Dit kan in grote centrales, waarin men elektrolyse van water toepast om waterstof te krijgen, maar dit is een erg kostbaar proces en bovendien belastend voor het milieu. Een andere mogelijkheid is om waterstof te halen uit natuurlijke vloeistoffen zoals methanol of aardgas door middel van een zogenaamde brandstofprocessor. Het voordeel van een brandstofprocessor is dat je geen zware tanks nodig hebt om de explosieve waterstof in te bewaren. Een nadeel hiervan is dat er wel een geringe hoeveelheid koolstofdioxide (CO_2) ontstaat, wat wel weer een belasting vormt voor het milieu.

Brandstofcellen voor elektriciteitscentrales zijn te groot en te heet (maximaal $1000\text{ }^\circ\text{C}$) om in een auto in te bouwen. Een techniek die veelbelovend is, en ook voor de "SAM" zal worden toegepast, is de "Proton Exchange Membrane FuelCell" (P.E.M.F.C.), hierover zullen we in de volgende paragraaf het een en ander toelichten. Bij het ombouwen van de "SAM" naar een hybride brandstofcel aangedreven, "F.C. – SAM", zijn er verschillende 'systeemcomponenten' voor de P.E.M.F.C. vereist, waarvan hieronder een opsomming wordt gegeven.

- Opslagtank(s) voor H_2 ;
- Reduceerventiel;
- Recirculatiesysteem;
- Condensaatafvangerventiel;
- Pomp (slangenpomp);
- Luchtfilter;
- Luchtcompressor (gem. $17\text{ m}^3/\text{h}$);
- Enthalpy wheel;
- Radiateur;
- Temperatuur sensor (thermokoppel);
- Magneet ventiel;
- Geleidbaarheidmeter (permeabiliteitsmeter);
- Waterstofsensor;
- Flow meter.

Ook van deze systeemcomponenten zal in de volgende paragrafen een korte uitleg worden gegeven.

§ 4.1 Werking van een P.E.M.F.C.

Het 'hart' van deze brandstofcel bestaat uit een elektrolyt met aan weerszijde een elektrode (de kathode en de anode). De zuurstof die langs de kathode stroomt zal worden gescheiden van de brandstof (bijvoorbeeld waterstof), welke aan de anodekant wordt aangeboden. Een katalysator zal hierbij de reactie tussen waterstof en zuurstof vergemakkelijken. Door de kathode, de positieve kant van de brandstofcel, zal de zuurstof gelijkmatig worden verspreid over een katalysator, dit geschiedt door middel van kanaaltjes. Tevens komen hier ook de vrijgekomen elektronen terug om samen met waterstof en zuurstof water te vormen in de katalysator. Tussen de kathode en de anode zit de 'Proton Exchange Membrane', die elektronen niet doorlaat en alleen positief geladen protonen geleidt.

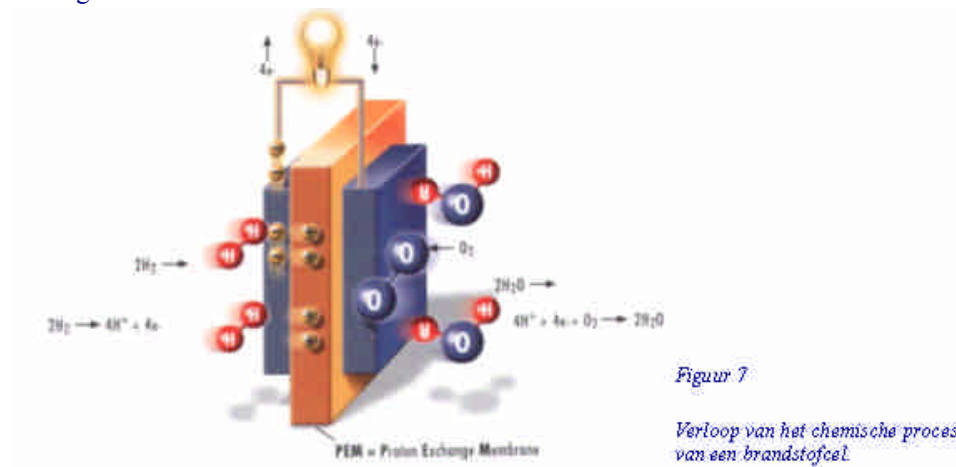
§ 4.2 Chemische proces van de brandstofcel (P.E.M.F.C.)

De katalysator aan de anode (–) zorgt ervoor dat het waterstofatoom wordt geïoniseerd, waardoor er protonen en elektronen ontstaan. Onder invloed van het protonen geleidende elektrolyt worden alléén de positief geladen waterstofionen (H^+) doorgelaten naar de kathodezijde (+), terwijl de elektronen via een omleiding naar de kathode kant worden geleid. De elektronenstroom via de omleiding wordt de geleverde 'elektriciteit' van de cel genoemd. Hierbij bouwt zich een elektrische spanning op. Het geleverde elektrische vermogen is hierbij gelijk aan het product van stroom en spanning.

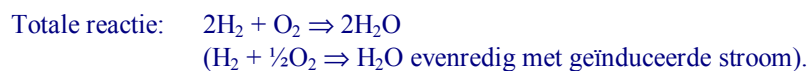
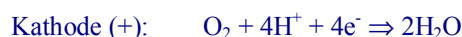
Bij de katalysator (aan de kathodezijde) komen de protonen en elektronen weer bij elkaar en reageren daar met de toegevoerde zuurstof, tot water (H_2O). Het elektrolyt bepaalt voor het overgrote deel de eigenschappen van de brandstofcel.

Dit is de voornaamste reden waarom de brandstofcel meestal naar het type elektrolyt worden genoemd.

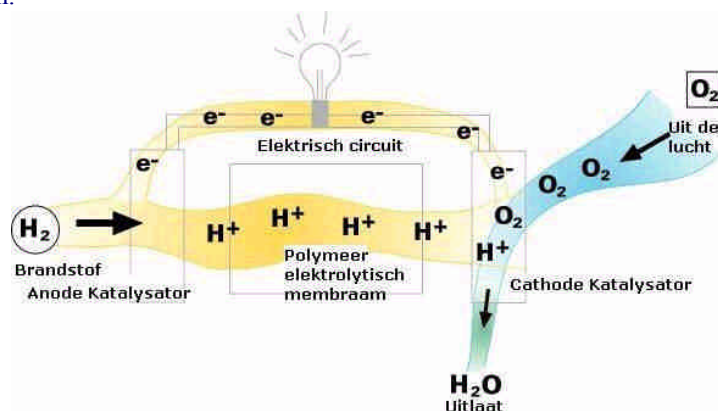
Om het 'chemische' proces van de brandstofcel ansich wat meer te visualiseren, wordt naar onderstaande figuur verwezen.



Wanneer een H_2 molecuul door de anodezijde gaat, wordt het over de katalysator geleid, waarbij het molecuul gesplitst wordt in twee H^+ ionen en twee e^- elektronen. De elektronen gaan door het externe circuit en leveren elektriciteit en komen uiteindelijk weer terug aan de kathodezijde. Ondertussen worden aan de kathodezijde de zuurstofmoleculen (O_2) gedrukt door de katalysator. Hierdoor splitst het molecuul zich in twee negatieve zuurstofionen. Deze ionen trekken de positieve waterstofionen aan en vormen zo samen een watermolecuul, waarmee de volgende reactie wordt verkregen.



Hierbij ontstaat echter heel weinig spanning, namelijk niet meer dan 0,7 volt. Om een redelijk vermogen te krijgen worden vele brandstofcellen aan elkaar gekoppeld (ook wel serieschakeling of "stack" genoemd). Dit alles gebeurt op relatief lage temperaturen, namelijk rond de $65^\circ C$, waarbij geen afvalstoffen ontstaan. De 'flow' van zuurstof en waterstof dóór de 'stack' ook als volgt te visualiseren.

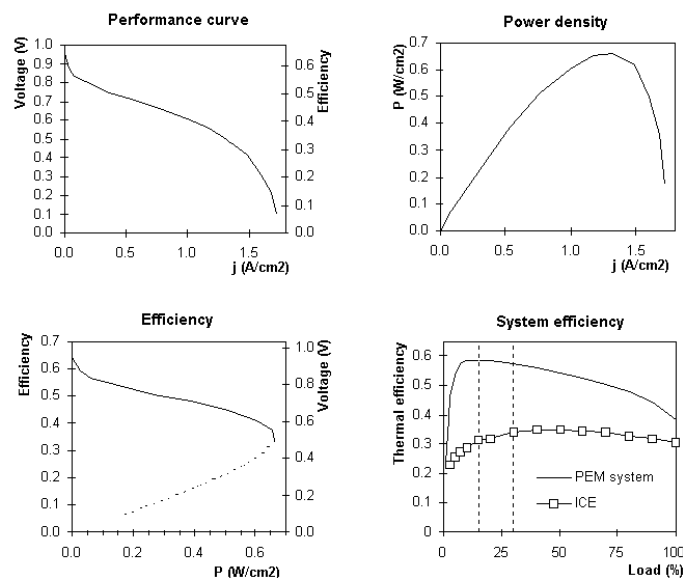


Het rendement van dit proces is c.a. 56 %. Er zal namelijk gelden dat:

$$h = \frac{U \cdot I}{LVH} \cdot 100 [\%] \Rightarrow h = \frac{U \cdot 2 \cdot F}{240 [KJ]} \cdot 100 [\%] \Rightarrow h = \frac{0.7 \cdot 2 \cdot 96485}{240 \cdot 10^3} \cdot 100 [\%] \approx 56 [\%]$$

Hierbij is LVH de verbrandingswaarde en "F" de constante van "Faraday". "U" is de karakteristieke spanning van één enkele brandstofcel (belast op zijn werkpunt) en ligt gebruikelijk in de buurt van de 0,7 volt.

Kenmerkende karakteristieke eigenschappen van een brandstofcel zijn hieronder weergegeven.

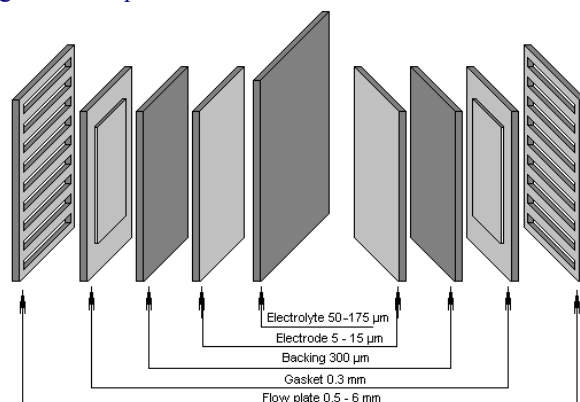


Figuur 9

Kenmerkende brandstofcel karakteristieken

In de "SAM" zullen drie 'stacks' á 50 cellen in serie worden geplaatst, waarmee er een nominale spanning van minimaal 90 volt gegenereerd moet kunnen worden. Bij 150 cellen in totaal vereist dit dus een spanning van 0,6 V per cel, en zoals juist bekend is dat goed haalbaar.

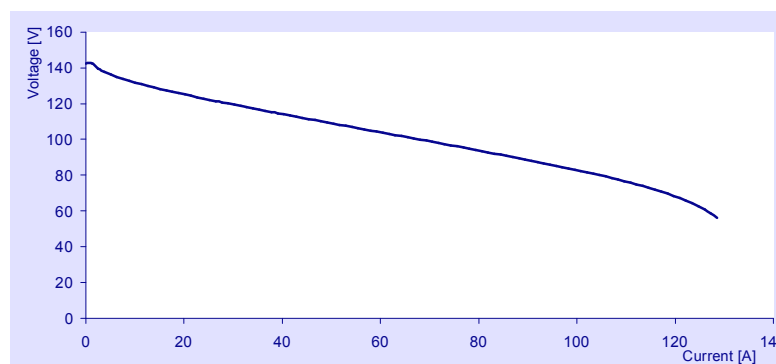
In onderstaande figuur is de opbouw van een P.E.M.F.C. - brandstofcel weergegeven.



Figuur 10

Opbouw P.E.M.F.C. 'stack'

Een 'stack' wordt samengebouwd door meerdere van deze cellen met een nullast welke navenant tussen de 0,5 en 0,7 volt zal variëren. Door samenbouwen van deze cellen tot een 'stack' voor de "SAM" zal de vermogenscurve er uit komen te zien zoals in onderstaande figuur; deze curve zal bij verdere berekeningen en regelmodellen in dit verslag als uitgangspunt worden gebruikt.



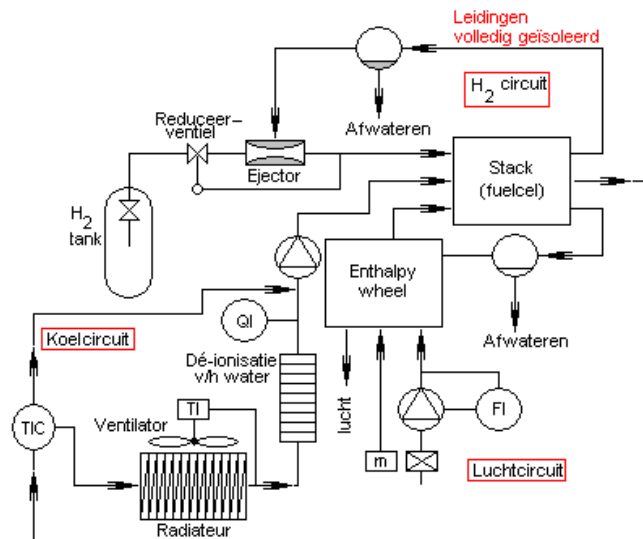
Figuur 11

Brandstofcel vermogenscurve

In het nu volgende hoofdstuk zal het systeem van de brandstofcel nader worden beschreven.

Hoofdstuk – 5 Het brandstofcel systeem algemeen

In het verlengde van datgene wat in voorgaande hoofdstuk aan verschillende deelsystemen is samengevat, zal in dit hoofdstuk nader worden ingegaan op de werking van deze systemen. In onderstaande figuur is het totale systeem van de brandstofcel, vereenvoudigd voorgesteld, weergegeven.



Figuur 12
Brandstofcel systeem

Om te voorkomen dat de gassen in dit systeem gaan condenseren moeten de leidingen van het H₂ – circuit goed geïsoleerd worden. De ejector in dit circuit is een venturi die H₂ aan de uitgang van de 'stack' terug zal voeren naar de ingang, om zodoende de systeempower te vergroten.

De deelsystemen van het brandstofcel regelsysteem zijn:

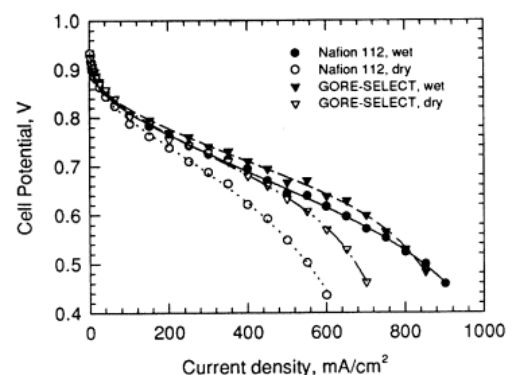
- H₂ (waterstof) circuit;
- Koelcircuit;
- Luchtcircuit.

De "Temperature Indicator and Controller" (T.I.C.) in het koelwatercircuit, zoals in bovenstaande schema linksonder is weergegeven, regelt de doorstroom van het water zodat de 'stack' zoveel mogelijk rond de vereiste 65°C blijft. Naast deze temperatuurregeling is er een ionenwisselaar in de figuur te zien (voor dé - ionisatie). Deze ionenwisselaar wordt gebruikt om te voorkomen dat het koelwater elektriciteit kan gaan geleiden, waardoor er kortsluiting in het koelcircuit kan ontstaan (hierdoor kan elektrolyse en daarmee explosiegevaar optreden).

In het luchtcircuit wordt er éérst voor gezorgd dat de aangevoerde lucht geen vuildeeltjes bevat, wat het systeem kan verontreinigen. Hierna komt er een ventilator of luchtpomp die er voor moet zorgen dat er altijd voldoende lucht aanwezig is in de 'stack', om de reactie goed te laten verlopen.

Om de massastroom van de lucht te bepalen wordt er een F.I. ("Flow indicator") toegepast.

De F.I. geeft een signaal door aan de controller (in ons geval de "Micro AutoBoX" [MABX] van "dSpace" (waarover in een later hoofdstuk meer), welke de meetwaarde (m) met de momentaan heersende stroom vergelijkt, en waar nodig aanpast. Het "Enthalpy Wheel" dient er voor om de 'aangezogen' lucht te bevochtigen. Als er namelijk droge lucht in de 'stack' wordt gezogen zal het polymeer uisdrogen en scheuren en de cel onherstelbaar beschadigen. Het overschot aan lucht zal worden afgevoerd naar de omgeving. In nevenstaande figuur wordt het 'gedrag' van een drogere resp. meer verzadigde (meer bevochtigde) 'stack' gegeven.



Figuur 13 'Stack' vochtigheidscurve

Om de "SAM" op een constante snelheid van ± 85 Km/h te laten rijden is er een celvermogen van c.a. 7 KW nodig. Als het werkelijk vermogen hoger is dan het berekende vermogen, dan zal de werkspanning lager komen te liggen en het rendement afnemen. Wordt daarentegen minder vermogen gevraagd, dan zal de werkspanning toenemen en zo ook het rendement. De gemeten waarden zullen geen invloed hebben op de componenten die gebruikt worden om de brandstofcellen te voeden. Dit komt omdat de toegepaste componenten allemaal een marge hebben rond het beoogde werkpunt. De vermogensseis van de brandstofcellen wordt gelegd op een waarde van 8 KW, waarvan:

- 1 KW om de componenten die het brandstofcelsysteem regelen van energie te voorzien;
- 7 KW om het voertuig een constante snelheid van ± 80 Km/h te geven.

Drie alternatieven waaruit gekozen kan worden bij het opslaan van waterstof in de "SAM" zijn:

- Opslag in gasvormige toestand in een gasfles (goedkoop, maar grote V/E verhouding);
- Opslag in vloeibare vorm in een 'container' (nadeel: -253°C om vloeibaar te maken);
- Opslag in een metaalhydride (opslag tussen metaalmoleculen, nadeel: zwaar).

Metaalhydrides beginnen bij een intermetallische verbinding welke op ongeveer dezelfde manier worden geproduceerd als een metaallegering. Ze hebben echter één verschil: als ze worden blootgesteld aan waterstof, bij een bepaalde druk en temperatuur, dan kunnen ze een grote hoeveelheid waterstof absorberen en hierdoor een metaalhydride vormen.

Hiermee kan, in vergelijking met opslag in een vloeibare vorm, bij een relatief klein volume waterstof worden opgeslagen (chemisch: $2\text{F} + \text{H}_2 = 2\text{FH}$, waarbij F het metaal is).

De toegepaste componenten voor het regelsysteem van de brandstofcel moeten aan de volgende eisen voldoen:

- Schokbestendig;
- Licht van gewicht;
- Compact;
- Energiezuinig;
- Geschikt voor DC;
- Goedkoop;
- Corrosiebestendig (RVS).

§ 5.1 Het H_2 - circuit

De massastroom van het gas is zodanig dat deze een stroomsnelheid heeft van max. 20 m/s door de systeem ducting (wordt standaard door T.S & C van E.C.N. gehanteerd). Indien we uitgaan van een gemiddelde flow H_2 van $4,5 \text{ m}^3/\text{h}$ (hetgeen reëel blijkt te zijn, zoals later in dit verslag zal blijken), is er c.a. 0,732 Kg waterstof nodig om een uur te kunnen rijden met de "SAM". Er zal gewerkt worden met een buisdiameter van 12 mm (I.D.), en zo zal inderdaad blijken dat:

$$\frac{dm}{dt} = r \cdot v \cdot A = 0,09 \cdot 20 \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 12 \cdot 10^{-3}\right)^2 \Rightarrow \dot{m} = 0,732 \text{ [Kg / h]}$$

De tank dient dus een zo klein mogelijk volume te hebben met een waterstofopslagcapaciteit van c.a. 0,75 Kg. Aan de veiligheid van de opslag van de waterstof worden hoge eisen gesteld.

De tank is in de regel een aluminium cilinder, omgeven door een "Glas Fiber Epoxy" (G.F.E.) composiet. De tank is hierdoor zéér licht (c.a. 15 Kg) wat veel gunstiger uitpakt dan toepassing van een metaalhydride tank (welke in de regel niet veel lichter is dan 65 Kg).

Bij een geactiveerde brandstofcel wordt er water geproduceerd. Dit water kan in de kleine kanalen van de 'flowplaten' van de 'stack' blijven zitten en er voor zorgen dat de rest van het kanaal wordt afgesloten van de reactie. Dit beïnvloedt de werking van de cel uiteraard ongunstig. Om er voor te zorgen dat er geen water in de cel blijft zitten, moet er een zekere overmaat aan gas door het kanaal stromen. Deze overmaat wordt, de sociometrische verhouding genoemd. Deze sociometrische verhouding is de chemisch juiste verhouding om een bepaalde hoeveelheid waterstof zo optimaal

mogelijk te mengen met zuurstof. Ook wordt de sociometrische verhouding wel met λ aangegeven. Bij armere lucht / waterstofmengsels (teveel zuurstof of te weinig waterstof) stijgt de λ waarde, bij rijkere mengsels (te weinig zuurstof of teveel waterstof) daalt de λ waarde.

Het reduceerventiel moet in het brandstofcelcircuit de inkomende waterstof doceren, zodat de druk die op de 'stack' komt te staan door het waterstofgas niet teveel verschilt van de uitgaande druk.

De luchtdruk zal geregeld worden op ongeveer 0,2 Bar overdruk (200 hPa boven Atm.).

Als de luchtdruk over een brandstofcel te hoog, dan kan het membraan (elektrolyt van 50 – 175 μm) stuk gaan. Ook kan het voorkomen dat de lucht zich gaat mengen met het waterstofgas waardoor er een explosief mengsel ontstaat.

Het reduceerventiel regelt de druk vóór de venturi op een bepaalde waarde af, waardoor ná de venturi de juiste druk wordt verkregen. Dit wordt gedaan door ná de venturi de druk te meten en deze te gebruiken om het regelventiel in te stellen. De moeilijkheid bij het regelventiel ligt in het feit dat er gebruik gemaakt wordt van waterstof, waarmee veel leveranciers geen ervaring hebben.

In de 'stack' wordt water gevormd welke, volgens de theorie, aan de kant van de lucht zal ontstaan. Uit testgegevens is echter gebleken dat, door diffusie dóór het membraan, 20% van het water aan de waterstofzijde terecht komt en 80% aan de luchtzijde. Met de 20% water aan de waterstofzijde kan het waterstofgas bevochtigd worden, zodat het membraan niet uitdroogt. Er zit hier echter ook een nadeel aan: het vloeibare water moet uit de gasstroom worden gehaald, omdat het water anders weer in de 'stack' terecht komt. Voor het 'afvangen' van water is een eenvoudige condensatafvangervoldoende.

§ 5.2 Het koelcircuit

In de koelleiding mag het water niet sneller stromen dan 4 m/s omdat anders het drukverlies in de leiding ontoelaatbaar hoog wordt. De leiding diameter moet minimaal 9 mm zijn (er zal hiermee maximaal $\frac{1}{4} \text{ dm}^3/\text{s}$ door de leiding stromen). Uiteindelijk is besloten een leidingdiameter van 15 mm toe te passen, waardoor er minder drukverliezen zijn en de pomp kleiner uitgevoerd kan worden. Om een geringe mate van ionenuitwisseling te voorkomen tussen koelmedium (veelal glycol of gedemineraliseerd water) en toegepaste materialen, wordt meestal RVS of kunststof leiding toegepast.

Een radiator of ventilator wordt toegepast om de warmte, die ontstaat door de oxidatie van waterstof, af te voeren naar de omgeving. Het koelende vermogen van de radiator moet c.a. 9 KW zijn om de 'stack' voldoende te koelen. In de praktijk is dit een groot koelvermogen gebleken voor de radiator die in de neus van het voertuig geplaatst kan worden, met name vanwege de weinig beschikbare ruimte van $l \times b \times h = 200 \times 450 \times 300 \text{ mm}$. Hiermee is er geen plaats meer voor een ventilator of radiatorhuis (hiervoor moet er nog een geschikte oplossing gevonden worden).

Een ionenwisselaar moet ervoor zorgen dat het koelmedium niet sterk verontreinigd raakt met ionen uit de leidingen en de 'stack'. Hierdoor wordt voorkomen dat het koelmedium gaat geleiden of dat er kortsluiting ontstaat. Om ervoor te zorgen dat het koelmedium niet teveel ionen bevat, zal de vloeistof éérst langs een kunsthars stromen, waardoor de positieve vrije ladingdragers (positieve ionen) worden 'afgevangen'. Vervolgens zal een tweede kunsthars ervoor zorgen dat alle negatieve vrije ladingdragers (negatieve ionen) 'afgevangen' worden. Een zgn. "Quality Indicator" (Q.I.), zal aangeven of het koelmedium sterk geïoniseerd is of niet (b.v. doordat de ionenwisselaar is beschadigd). Dergelijke indicaties kan men in de toekomst op het dashboard van de "SAM" gaan weergeven.

De temperatuurregelaar zit in het regelsysteem van de brandstofcel om de temperatuur in de 'stack' te regelen. De temperatuur wordt gemeten in het koelmedium dat de 'stack' uitstroomt. Hiermee wordt er meer of minder koelmedium langs de radiator gevoerd, waardoor er meer of minder warmte afgevoerd zal worden. Als temperatuurregelaar wordt er een temperatuur sensor in het koelwater opgenomen, deze meet de temperatuur van het uitstromende water, deze waarde wordt direct doorgegeven aan de controller. Daarnaast zullen er twee magneet ventielen worden opgenomen in het koelcircuit. De besturing kan met het signaal, afkomstig van de temperatuursensor, de regelventielen aansturen, waardoor er meer of minder water door de radiator zal stromen. Verder zal er een tweede sensor aan de instroom opening van de 'stack' controleren of het temperatuurverschil tussen de in en uitgang niet ontoelaatbaar hoog oploopt, anders is er namelijk een verhoogde kans op condensvorming aan de instroomzijde (ook dit kan met de later in dit verslag besproken "MABX" worden gerealiseerd).

Als laatste onderdeel in het koelcircuit is er een pomp aangebracht. De pomp wordt als laatst in het koelcircuit aangebracht omdat hier het koelmedium het koudst is. De pomp zelf heeft géén regeling en zal in werking treden als het voertuig wordt gestart. De pomp zal er voor moeten zorgen dat het debiet rondgepompt medium genoeg is om het temperatuurverschil tussen ingang en uitgang van het systeem binnen de 10°C te houden. De pomp moet voldoende massastroom kunnen leveren bij een drukverhoging van 1 Bar (1000 hPa). Er is hier gekozen voor een centrifugaalpomp, vanwege de eenvoudige uitvoeringsvorm.

§ 5.3 Het luchtcircuit

De luchtsnelheid mag in dit circuit niet boven de 20 m/s uitkomen (vastgesteld in de specificaties van T.S. & C van E.C.N.). Met een beoogde flow van 22 m³ per uur komen we dan op een buisdiameter van 25 mm (eigenlijk 20 mm, maar 25 mm is gekozen om verliezen zoveel mogelijk te minimaliseren).

Er is een luchtcompressor nodig om de lucht aan te zuigen en op de gewenste druk te brengen voor de 'stack'. De ventilator wordt hierbij door de besturing geregeld (MABX). Deze leest m.b.v. een flow indicator hoeveel lucht er dóór het systeem stroomt en bepaald, aan de hand van het gevraagde vermogen, of de ventilator harder of zachter moet gaan draaien. Er zijn voor de ventilator vaak weinig oplossingen voor de hand omdat ventilatoren vaak een hoge flow bij een lage druk genereren (een compressor daarentegen levert vaak een te hoge druk bij een kleine flow). Als luchtcompressor is uiteindelijk de keuze gevallen op een zijkanaalventilator van "Rietschle", deze ventilator is een van de weinige die aan de gestelde eisen voldoet, namelijk: 160 mBar (max.) bij 17 m³/h (zoals straks zal blijken uit fig. 65, rode grafiek, waarbij de gemiddelde flow inderdaad 17 m³/h is, maar wel periodiek uitschieters kunnen ontstaan van 30 m³/h). Een luchtfilter zal ervoor moeten zorgen dat de aangevoerde lucht naar de ventilator en de 'stack' niet teveel vervuiling bevat.

Het zogenaamde "Enthalpy Wheel" zorgt ervoor dat de lucht die de 'stack' ingaat wordt bevochtigd, dit om het uitdrogen van het membraan ('scheiding' van de cel tussen waterstof en lucht deel) te voorkomen. Het "Enthalpy Wheel" is opgebouwd uit een poreus keramisch materiaal ("corduriet") dat wordt rondgedraaid door een motor. Het keramische materiaal bevat minuscule kleine gaatjes (vierkante kanalen) in de richting van de gasstroom. Het "Enthalpy Wheel" zorgt er in de regel voor dat (zoals dat bij de uitvoering die reeds door E.C.N. is aangeschaft) c.a. 85% van het inkomende vocht aan de droge lucht wordt afgegeven. Gewenst is om het "Enthalpy Wheel" rechtstreeks te plaatsen om zo een zo hoog mogelijk rendement te garanderen. Als de lucht in de "stack" terechtkomt, dan is deze verzadigd (de relatieve vochtigheid is c.a. 100%) door het water wat ontstaat tijdens de reactie. Omdat de ingaande lucht van de "stack" eigenlijk al geheel verzadigd is, zal deze nauwelijks meer vocht op kunnen nemen. Hierdoor zal bijna al het vocht wat tijdens de reactie ontstaat in de vorm van vloeibaar water aan de uitgang ontstaan. Om dit water 'af te vangen' wordt, evenals eerder besproken in het H₂-circuit, een condensatafvangster toegepast die qua werking verder hetzelfde is, hoewel in het luchtcircuit méér water afgevangen moet worden.

Verder moet er een waterstofsensoren aanwezig zijn om te controleren of er niet te hoge concentraties waterstof in de lucht aanwezig zijn. Het kan namelijk voorkomen dat ergens in het systeem een lek ontstaat, waardoor er waterstof ontsnapt. Als het waterstofgas in een afgesloten ruimte terechtkomt waar weinig ventilatie is, dan kan de concentratie waterstofgas een waarde van 4 tot 75% van het totale volume aan lucht bereiken (hierdoor kan er explosiegevaar gaan optreden). Door aan de besturing van het regelsysteem door te geven wat de concentratie waterstofgas is in de betreffende ruimte (bijvoorbeeld de 'cockpit van de "SAM") dan kan hierop geanticipeerd worden en zal de bestuurder een melding krijgen in een noodsituatie.

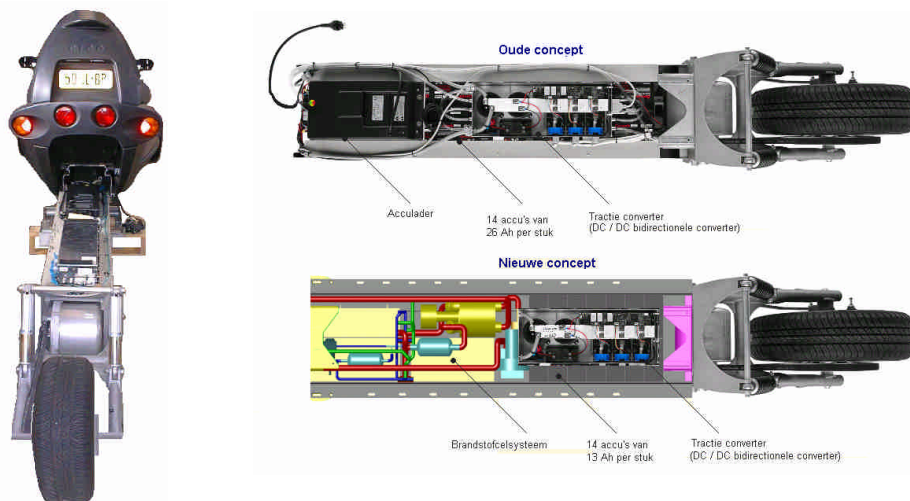
§ 5.4 Appendages van het brandstofcel systeem

Onder "appendages" verstaan we alle onderdelen die het regeltechnische proces van de brandstofcel (FuelCell) 'in de hand' houden / bewaken en zo voor een veilig verloop van het proces zorgen. Onder appendages kunnen de volgende systemen vallen: besturingen (regeltechnisch), sensoren (voor het meten van de verschillende systeemgrootheden / systeemparementers) en kleppen (flow valves; meters etc. ook wel "actuators" genoemd). De besturing van de appendages zal ook gerealiseerd worden door de "MABX". Bij sensoren die voor het in kaart brengen van verschillende

systeemparemeters gebruikt kunnen worden, kan men denken aan bijvoorbeeld: Thermokoppels, druksensoren, flowmeters, "Quality Indicators", "Temperature Indicator and Controllers", etc.. Ook is het aan te bevelen om de spanning óver en de stroom dóór de brandstofcel te meten, om zo vroegtijdig te kunnen voorkomen dat men de cel kan gaan overbelasten; dergelijke 'bewakingen' (ook wel "watchdog functions" genoemd) kunnen eveneens door de "MABX" worden gerealiseerd.

§ 5.5 Overige systeemeisen m.b.t. de 'spine' van de "SAM"

De brandstofcel, zoals deze in de 'spine' ('ruggengraat' van de "SAM") zal worden aangebracht, zal een afmeting moeten hebben van c.a. 7 accu's van 26 Ah (wat overeenkomt met 14 accu's van 13 Ah). Hierin moeten alle deelsystemen die in voorgaande paragrafen zijn toegelicht, met uitzondering van de radiator en het "Enthalpy Wheel", worden geplaatst. In onderstaande figuur is de oude resp. nieuwe situatie te zien voor wat betreft de indeling van deze 'spine'. Ook is in de linker figuur te zien hoe het 'binnendeel' van deze 'spine' uit de "SAM" wordt geschoven.



Figuur 14 Oude en Nieuwe concept indeling "SAM" – 'spine'

De systemen in de 'spine' die gekoeld worden zijn achtereenvolgens de "DC / DC – converter", "DC / AC – tractie converter" (ook wel "drive" genoemd) en de drie fase permanente magneetmotor. Er kan hierbij gebruik gemaakt worden van het al bestaande koelsysteem van de "SAM" (dit is qua koelcapaciteit mogelijk zoals in een later hoofdstuk zal blijken), ook kan er desgewenst een 'aftakking' worden gemaakt van het koelsysteem van de 'stack'. Bij het originele (en huidige) koelsysteem van de "SAM" wordt er, voor wat betreft de koeling van het glycol, gebruik gemaakt van de bodemplaat van het *omhullende deel* van de 'spine'. Hiermee wordt het koelmedium rijwind gekoeld. Indien de omstandigheden minder gunstig zijn als die van recente metingen (bijvoorbeeld bij een zwaardere systeemlast en hogere omgevingstemperaturen), en men besluit de "DC / DC – converter" in het bestaande koelcircuit op te nemen, kan worden besloten om aluminium strippen aan te brengen in de lengterichting van de 'spine' waardoor het koelend vermogen significant toeneemt.

N.B.: De "DC / DC – converter" en "DC / AC – converter" dienen met rubberen trillingsdempers 'afgeveerd' te worden (door gebruik te maken van zgn. "burrymounts") om stootbelastingen te dempen, en de levensduur van de converters te vergroten.

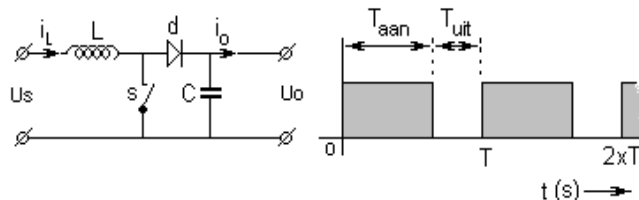
Hoofdstuk – 6 De “DC / DC – converter” algemeen

Met de “DC / DC – converter” (ook wel “Boostconverter” genoemd) wordt het spanningsniveau van de brandstofcel (FuelCell) op het niveau gebracht van het accupakket. Het spanningsniveau van de brandstofcel is nominaal c.a. 90 V (werkpunt) maar zal in de praktijk variëren tussen grofweg 50 en 150 volt.

Het ‘boosten’ van de spanning wordt gerealiseerd door (geschakeld) energie in de spoel van de boostconverter op te slaan en deze vervolgens (geschakeld) samen met de bronspanning aan de uitgang af te geven. De spoel bepaald uiteindelijk de grootte van de rimpelstroom; deze moet aangepast worden aan de eis van de brandstofcel. Door het toepassen van een z.g.n. current-mode control is het mogelijk om het vermogen van de brandstofcel te beperken tot een waarde van c.a. 8 KW (max.), waarmee de ingangsstroom van de converter naar een gewenste waarde wordt geregeld. Zo wordt tegemoet gekomen aan het werkgebied van de brandstofcel.

§ 6.1 Werking van de elektrische “Boost Converter” koppeling

Het schema van een “Boost converter” kunnen we ons als volgt voorstellen:



Figuur 15 vereenvoudigde werking “Boost Converter”

Op het moment dat de schakelaar (s) is gesloten geldt de periode T_{aan} en op het moment dat de schakelaar is geopend geldt de periode T_{uit} (zie rechter figuur). De totale periode is dan $T = T_{aan} + T_{uit}$. De diode (d) zal hierbij eveneens als een ‘schakelaar’ fungeren en sperren als de schakelaar (s) is gesloten en vice-versa. Tijdens het sluiten van de schakelaar (s) zal de ‘magnetische’ energie worden opgeslagen in de spoel (L) en deze zal, gesuperponeerd met ingangsspanning (U_s) aan de uitgang (U_o) komen te staan. Nu gaan we eens beschrijven wat en precies plaatsvindt als de schakelaar is gesloten en als de schakelaar is geopend.

Gedurende het tijdsinterval T_{aan} is de schakelaar (s) gesloten, en de uitgangsspanning (U_o) - zoals we zodadelijk zullen zien, groter dan nul. De ingangsspanning U_s (gelijkspanning) staat nu rechtstreeks over de spoel (L) en zo zal voor de stroom door de spoel (i_L) gedurende T_{aan} gelden dat:

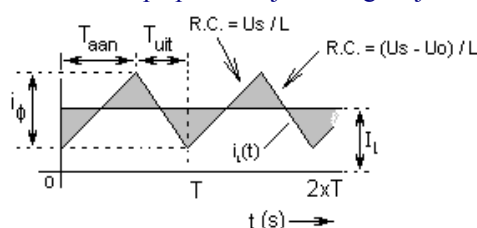
$$i = \int \frac{U}{L} dt$$

$$i_L(T_{aan}) = i_L(0^+) + \frac{1}{L} \int_0^{T_{aan}} U_s dt \Rightarrow i_L(T_{aan}) = i_L(0^+) + \frac{U_s \cdot t}{L} \Big|_0^{T_{aan}}$$

Zodat:

$$i_L(T_{aan}) = i_L(0^+) + \frac{U_s \cdot T_{aan}}{L}$$

Gedurende het tijdsinterval tussen $t = 0$ en $t = T_{aan}$ zal de stroom door de spoel (L) (tot benadering) lineair toenemen, zoals in de onderstaande figuur is te zien. Omdat de stroom in de spoel niet onmiddellijk van polariteit kan wisselen (hiervoor zou een oneindig groot vermogen nodig zijn), zal de stroom $i_L(0^+)$ gelijk zijn aan de stroom nét voor het omschakelen van de schakelaar (s) naar de open dan wel gesloten toestand. De scherpe pieken zijn dus eigenlijk discontinuïteiten.



Bij nevenstaande figuur geldt tevens:

$$i_L = I_L + i_R(t)$$

Figuur 16 Spoelstroom verloop “Boost Converter”

Als de schakelaar (s) is geopend, dan zal de diode in geleiding gaan (stroom van anode naar kathode), en zal de condensator (C) onder spanning komen te staan. Om het gedrag hiervan te vereenvoudigen nemen we aan dat de rimpelspanning aan de uitgang klein is t.o.v. het signaal zelf. Met deze aanname kunnen we stellen dat de spanning over de spoel constant is en dus: $U_s - U_o$. Nu kunnen we de stroom dóór de spoel, ná tijdsinterval $t = T_{uit}$, als volgt bepalen:

$$i_L(T) = i_L(T_{aan}) + \frac{1}{L} \int_{T_{aan}}^{T_{aan}+T_{uit}} \frac{U_s - U_o}{L} dt \Rightarrow i_L(T) = i_L(T_{aan}) + \frac{(U_s - U_o) \cdot t}{L} \Big|_0^{T_{aan}+T_{uit}}$$

Zodat:

$$i_L(T) = i_L(0^+) + \frac{U_s \cdot T_{aan}}{L} + \frac{(U_s - U_o) \cdot T_{uit}}{L}$$

Als U_o groter wordt dan U_s , dán zal de stroom door de spoel afnemen gedurende het tijdsinterval T_{uit} (zie desgewenst bovenstaande figuur). Omdat het systeemgedrag periodiek verloopt, zal het zo moeten zijn dat de stroom door de spoel (i_L) op $t = 0^+$ en $t = T$ gelijk moet zijn, ofwel: $i_L(T) = i_L(0^+)$.

Hierdoor geldt:

$$\frac{U_s \cdot T_{aan}}{L} = \frac{(U_o - U_s) \cdot T_{uit}}{L} \Rightarrow U_s \cdot T_{aan} = (U_o - U_s) \cdot T_{uit} \Rightarrow U_s \cdot (T_{aan} + T_{uit}) = U_o \cdot T_{uit} \Rightarrow$$

$$U_o = U_s \cdot \frac{T}{T_{uit}} = \frac{U_s}{1 - T_{aan}/T} \quad \text{dus:} \quad \boxed{U_o = \frac{U_s}{1-d} \quad \text{met: } d = T_{aan}/T}$$

Hierbij is “ d ” de verhouding van tussen T_{aan} en T hetgeen ook wel de “*duty-cycle*” wordt genoemd. Het is verassend om te zien dat de vergelijking voor U_o onafhankelijk is van de zelfinductiecoëfficiënt van de spoel (L). Een extra ontwerpparameter is nu vereist om tóch de waarde van “ L ” te kunnen dimensioneren. Dit doen we aan de hand van de zgn. “*ripple current*” (i_ϕ = rimpelstroom) van de spoel, zoals deze aan de linkerzijde van de verticale as is gesitueerd in voorgaande figuur. Deze “*ripple current*” is te definiëren als:

$$i_\phi = \frac{U_s}{L} \cdot T_{aan} = \frac{U_o - U_s}{L} \cdot T_{uit}$$

Hierdoor kunnen we de zelfinductiecoëfficiënt van de spoel (L) als volgt beschrijven:

$$L = \frac{U_s}{I_\phi} \cdot T_{aan} = \frac{U_s}{I_\phi} \cdot T_{aan} \cdot \frac{T}{T} = \frac{U_s \cdot T}{I_\phi} \cdot \frac{T_{aan}}{T} \quad \text{en hieruit kunnen we opmaken (wetende dat: } d = T_{aan}/T \text{):}$$

$$\boxed{L = \frac{U_s \cdot d}{I_\phi \cdot f}} \quad \text{waarbij: } f = 1/T \text{ [Hz].} \quad \text{In ons geval: } 500 \mu\text{H}$$

We zien dat bij een toename van de frequentie, de zelfinductiecoëfficiënt van de spoel kleiner wordt. Gebruikelijke frequenties liggen meestal tussen de 25 Hz en 100 KHz.

De gemiddelde stroom dóór de spoel (I_L), zoals deze aan de rechterzijde van de verticale as is gesitueerd in voorgaande figuur, is voor een ideale converter groter dan de stroom i_o die voor de betreffende belasting aan de uitgang beschikbaar komt. Hiermee zal het vermogen wat aan de ingang van de “boost converter” wordt ‘aangebracht’ volledig ten goede komen aan de belasting die men aan de uitgang van de converter aanbrengt.

Wetende de voedingsstroom aangeduid wordt als “ i_s ”, zal gelden dat: $U_s \cdot i_s = U_o \cdot i_o$.

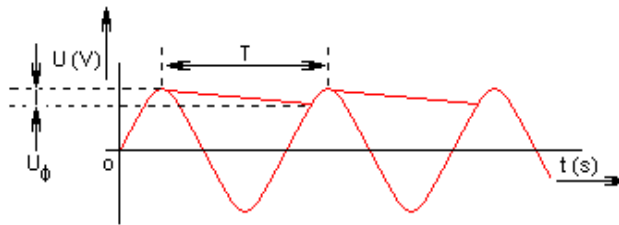
Hierdoor kunnen we de volgende formule vinden:

$$i_s = i_o \cdot \frac{U_o}{U_s} = i_o \cdot \frac{T}{T_{uit}} \quad \text{zodat:} \quad \boxed{i_s = \frac{i_o}{1-d}}$$

Met voorgaande is aangetoond dat de ingangsstroom (i_s) groter is dan de stroom die aan de uitgang beschikbaar komt (i_o) verhouding: i_s / i_o . De factor die hiertussen zit is dezelfde factor als die tussen de

uit en ingangsspanning (U_o / U_s). Merk op dat de spoel op de juiste manier moet worden ontworpen om op de juiste manier te kunnen opereren bij de grote gemiddelde stroom.

De capaciteit (C) wordt toegepast om de spanningsrimpel (U_ϕ) te verminderen, zoals in onderstaande figuur is te zien.



Figuur 17 Aflakking spanningsrimpel U_ϕ

Hierbij zal gelden dat:
$$U_\phi = \frac{I_o}{C} \cdot T_{aan} = \frac{U_o \cdot T_{aan}}{R \cdot C} = \frac{U_o \cdot T \cdot d}{R \cdot C}$$

waarbij "R" de weerstandswaarde van de belasting aan de uitgang is.

Hieronder wordt nu een korte samenvatting gegeven van de meest belangrijke formules zoals deze zojuist zijn bepaald ...

Uitgangsspanning:

$$U_o = U_s \cdot \frac{T}{T_{uit}} = \frac{U_s}{1 - \frac{T_{aan}}{T}} = \frac{U_s}{1 - d}$$

Voedingsstroom:

$$i_s = i_o \cdot \frac{T}{T_{uit}} = \frac{i_o}{1 - \frac{T_{aan}}{T}} = \frac{i_o}{1 - d}$$

Spoelstroom:

$$i_L(T) = i_L(0^+) + \frac{U_s \cdot T_{aan}}{L} + \frac{(U_s - U_o) \cdot T_{uit}}{L}$$

Zelfinductiecoëfficiënt v/d spoel:

$$L = \frac{U_s}{i_f} \cdot T_{aan} = \frac{U_s \cdot T}{i_f} \cdot \frac{T_{aan}}{T} = \frac{U_s \cdot d}{i_f \cdot f}$$

Capaciteit (condensator):

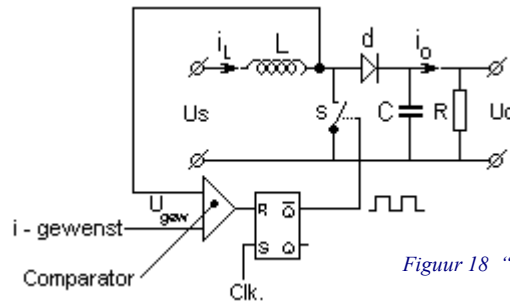
$$C = \frac{U_o \cdot T}{U_\phi \cdot R} \cdot \frac{T_{aan}}{T} = \frac{U_o \cdot T \cdot d}{U_\phi \cdot R}$$

In ons geval: 100 μ F

Bij veel "boost converter" schakelingen wordt i.p.v. de schakelaar (s) ook veel gebruik gemaakt van een (schakel -) transistor, met de juiste periodieke aansturing van de basis. Een transistor kan je namelijk (om het maar eens eenvoudig te omschrijven) toepassen als een elektrisch 'aanstuurbare' schakelaar of regelbare weerstand.

Veelvuldig is in het verleden bij E.C.N. gebleken dat de "boost converter" uitermate goed dienst doet als 'spanningbooster' voor de brandstofcel.

Omdat het schema van de "boost converter", in voorgaande figuur, nog niet zodanig is ontworpen dat de hoeveelheid stroom van de belasting is begrensd, kunnen we een overgaan tot het ontwerpen van een zgn. "current-mode" controller. Deze controller in het schema van de "boost converter" ondergebracht resulteert in een schema zoals in onderstaande figuur is te zien.

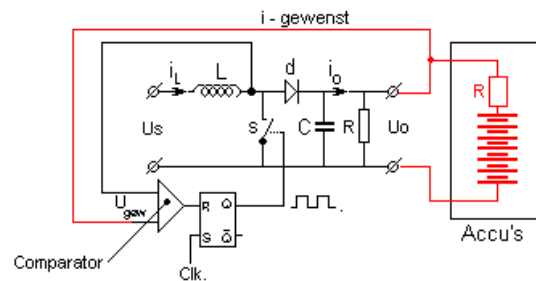


Figuur 18 "Boost Converter" met "RS-FF" regeling.

Bij deze "current-mode" regeling wordt er een "Pulse Width Modulator" (P.W.M.) gebruikt als klokpulsgenerator (zie §6.3 voor een gedetailleerde beschrijving van de werking hiervan) door toepassing van een "duty-cycle". De flip-flop (RS-FF) zal bij 'setten' logisch nul aan de uitgang geven waardoor de diode spert en een elektronenstroom van kathode naar anode wordt onderbroken. Hiermee zal de spoel van magnetische energie worden voorzien (omdat dan schakelaar "s" is gesloten). Op het moment dat de spoel een stroom heeft bereikt die overeenkomt met "i – gewenst", zal de RS-FF een 'reset' krijgen, waardoor de uitgang van de RS-FF logisch één wordt, en zal de schakelaar openen en de spoelspanning en de spanning aan de ingang tezamen aan de uitgang komen te staan (diode geleidt: elektronenstroom van anode naar kathode is het gevolg).

Bij een brandstofcel spanning van c.a. 90 V (de stroom is dan c.a. 90 A overeenkomstig het "werkpunt" van de brandstofcel), zal de belastingsspanning dan op ongeveer 170 V uitkomen (bij een amperage van c.a. 48 A).

De gewenste stroom, de stroom die het accupakket 'verlangt' bij normaal bedrijf, kan als gewenste stroomwaarde in het schema worden ondergebracht. Nevenstaande figuur toont het een en ander.

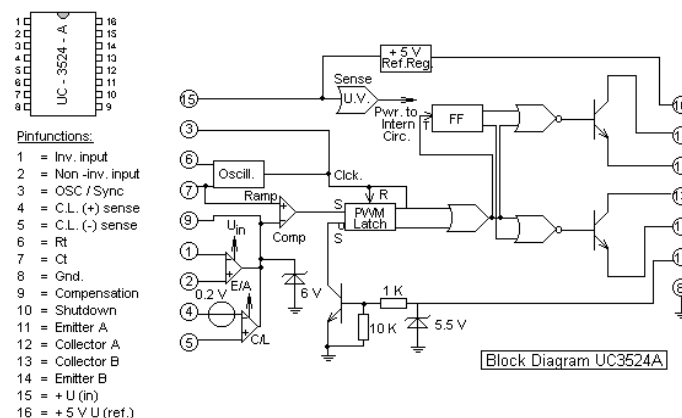


Figuur 19 "Boost Converter" met stroomregeling

N.B.: De regelstrategie / modellering zal in hoofdstuk 8 straks uitvoerig worden behandeld.

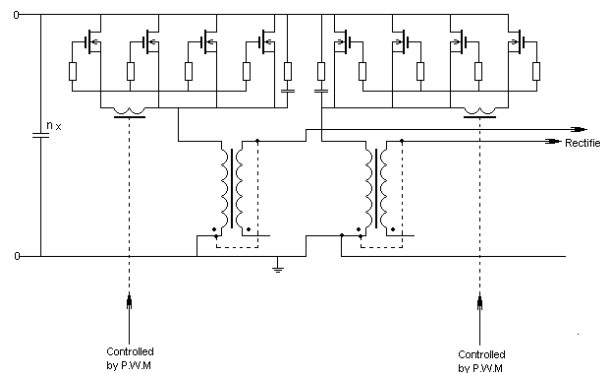
§ 6.3 "Puls Width Modulator" (P.W.M.)

Een "Puls Width Modulator" (P.W.M.), in voorgaande paragraaf eenvoudig voorgesteld als een RS-FF in combinatie met een oscillator voorafgegaan door een comparator, wordt in de regel ondergebracht in een I.C. ("Integrated Circuit"). Veelvuldig wordt er gebruik gemaakt van de UC3524A van "Integrated Circuits™", zoals hieronder weergegeven:



Figuur 20 DeUC3524A van "Integrated Circuits™"

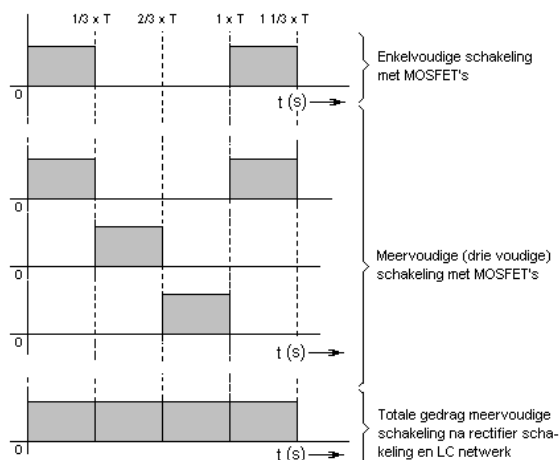
De UC3524A controller unit opereert bij een frequentie die wordt gegenereerd door een tijdconstante τ overeenkomstig het product van R_t en C_t . R_t genereert een constante laadstroom voor C_t en al resulteren in een constante voltage "ramp" als functie in de tijd, welke de comparator (comp.) zal voeden. De "comparator" zal op zijn beurt een lineaire regeling verzorgen voor de uitgangspuls breedte door aansturing van de "error amplifier" (E / A). De + 5 V spanningsstabilisator, die bovenin dit schema staat, verzorgt een referentiespanning van $5\text{ V} \pm 0.1\%$ aan de uitgang, alsook een constante spanning voor het interne circuit. De referentiespanning die hierdoor wordt verkregen kan extern met een weerstandsbrug (door spanningsdeling) naar wens worden aangepast binnen het "common-mode" bereik van de "error amplifier". Ook mag hier een externe referentie spanningsbron voor worden toegepast. De uitgang van de versterker ontleent zijn gevoeligheid aan een extern weerstandsnetwerk zodat er een terugkoppel ("feedback") signaal voor de "error amplifier" wordt verkregen. De uitgang van deze amplifier wordt vervolgens vergeleken (door middel van een verschilversterker of "comparator") met die van de lineaire 'ramp' afkomstig van C_t . De hiermee verkregen 'gemoduleerde' puls zal dan vervolgens, via een FF ("Flip Flop" of geheugen-schakeling) de ene of de andere uitgangstransistor aansturen. De "Flip Flop" zal worden 'ge-toggled' (als het ware worden 'ge-reset') met de oscillator frequentie. De breedte van de puls zal worden gerealiseerd door de tijdconstante (τ) en kan desgewenst met de grootte van C_t worden aangepast. De aansturingfrequentie van één van de uitgaande transistoren zal uiteraard de helft van de oscillatorfrequentie zijn. De uitgang van de "Error Amplifier" deelt de gezamenlijke ingang van de verschilversterker met die van de stroombegrenzing alsook die van het "shutdown" (uitschakel) circuit. Dit punt is ook extern beschikbaar. Met de uitgaande transistorschakelingen in dit I.C. worden zogenaamde IGBT ("Insulated Gate Bipolar Transistor") schakeling beurtelings open en dicht gestuurd, en zal na spanningsverdubbeling door middel van zogenaamde *doorgeschakelde trafo's* een nagenoeg verdubbelde spanning aan de uitgang worden verkregen. Van zo'n schakeling is hieronder een afbeelding weergegeven:



Figuur 20 IGBT schakeling

De ingangsspanning zal energie in de kern induceren die bij de spanning aan de uitgang wordt opgeteld. Hierdoor komt er (indien primaire en secundaire wikkeling gelijk zijn) een twee maal zo hoog spanningsniveau aan de uitgang beschikbaar.

Door nu meerdere IGBT - trappen parallel te schakelen, kunnen we een nog hoger uitgangsvermogen verkrijgen, hetgeen met onderstaande figuur wordt aangetoond.

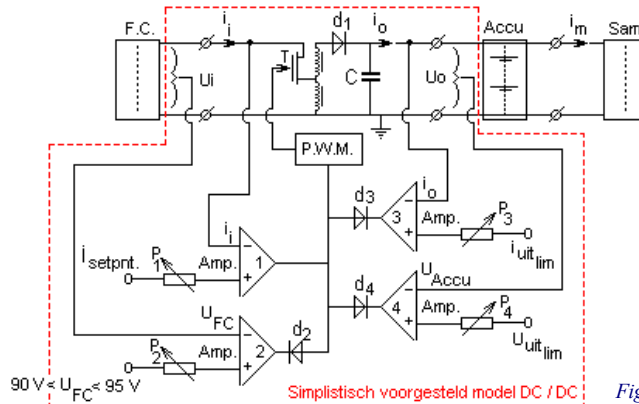


Figuur 21 IGBT koppeling

In nevenstaande figuur hebben we, in het eerste geval, met een "duty cycle" ("d") van T_{aan} / T is 25 % te maken, en in het geval van de (in dit voorbeeld drie) afzonderlijke takken ook. Tezamen kunnen de drie afzonderlijke takken gecombineerd worden tot een "duty cycle" van honderd procent. Uiteraard zijn er wat verliezen bij overschakeling van de ene tak naar de andere tak, edoch dit zal – in combinatie met de rest van de schakelingen in de "DC / DC converter" – moeten resulteren in een totale systeempower van c.a. 95 á 96 % (hetgeen klopt met de metingen zoals deze in paragraaf 6.5 wordt besproken).

§ 6.4 Beveiligingen in de “Boost Converter” koppeling

De converter kunnen we, mét beveiligingen, schematisch als volgt voorstellen:



Figuur 22 Converter met beveiligingen

De ingangsspanning “ U_i ” van de converter zullen we met potmeter “P2” afstellen op een spanning tussen de 50 en 150 volt (binnen het ‘domein’ van de brandstofcel). Op het moment dat de ingangsspanning van de converter te hoog zal worden, zal de uitgang van opamp 2 ‘laag’ worden (spanningsniveau aan de kathode-zijde van diode “d2” wordt laag: 0 V). Hierdoor wordt de “P.W.M.” (“Pulse Width Modulator”) minder uitgestuurd (doordat “d2” in geleiding komt) en zal het spanningsniveau aan de ingang van de converter dalen. Door de potmeter P1 op een “setpoint” (“ i_{setpnt} ”) af te regelen wordt de stroomvraag van de “F.C.” begrensd.

Op het moment dat de ingangsstroom van de converter deze waarde probeert te overschrijden zal deze stroom eveneens door de “P.W.M.” worden gereduceerd. Hetzelfde principe wordt voor de uitgang van de converter toegepast, voor de begrenzing van “ U_o ” en “ i_o ”, alleen wordt er nu uitsluitend gebruik gemaakt van een externe potentiometer instelling (geen “setpoint” sturing). Deze beveiliging wordt toegepast om beschadiging van de accu te voorkomen.

De converter heeft dus een stroomregeling aan de ingang gekregen, waarbij zowel de spanningen aan de ingang en uitgang worden ‘bewaakt’, alsook de uitgangsstroom.

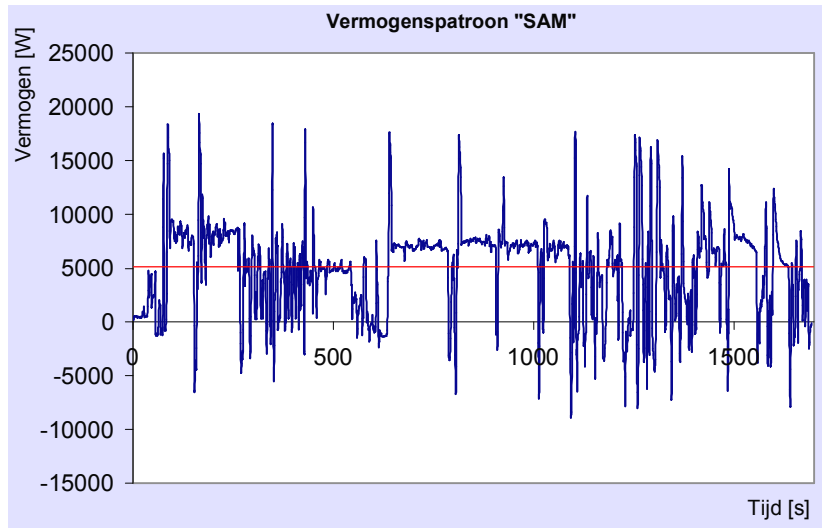
De stroom die de converter van de “F.C.” wenst is tevens een ‘maat’ voor de benodigde hoeveelheid toegevoerde waterstof en zuurstof aan de “F.C.”, en dus tevens een ‘maat’ voor de instelling van de waterstof en zuurstof klep. De stand van deze kleppen zal worden bepaald door de “MABX” (dit is een “dSPACE” interface die softwarematig het systeem ‘meet’, en waar nodig ingrijpt in het proces). Zo zal de “MABX” de spanning en stroom aan de uitgang van de converter meten, alsook de ‘stroomvraag’ (“ i_o ”) van de motor. Hiermee is, wetende dat het rendement of performance (“ η ”) van de converter c.a. 95 ... 99 % is, de vereiste ingangsstroom (“ i_i ”) bekend. Omdat er, voor de brandstofcel, een verband bestaat tussen de geleverde stroom en stand van waterstof en zuurstofklep, zal de “MABX” middels voornoemde systeemparameters de klep – actuatoren hiervan aansturen. De ingangsstroom van de converter, zoals de “MABX” deze via sensoren zal berekenen, kan als volgt worden bepaald:

$$i_i = \frac{U_o \cdot i_o}{U_i \cdot \eta}$$

Door nu de berekende en verkregen stroom aan de ingang van de converter met elkaar te vergelijken kan, door middel van een “P.I.D.” regeling, de systeemresponsie (transiënt) en systeem -error ($i_g^{(gemeten)} - i_i^{(berekend)}$) worden geoptimaliseerd. Voor de “MABX” zal er van een “Controller Area Network” (CAN) netwerk gebruik gemaakt worden en zullen verschillende systeemparemeter via AC/DC en DC/AC converters (“CAN” controllers) worden gemeten dan wel aangestuurd. Op alle deelsystemen van de “SAM”, dus ook op de converter, moeten er dus meet en regelpunten komen, zodat de “MABX” het gehele proces ‘in de hand’ kan houden.

§ 6.5 Metingen aan de “DC / DC – converter”

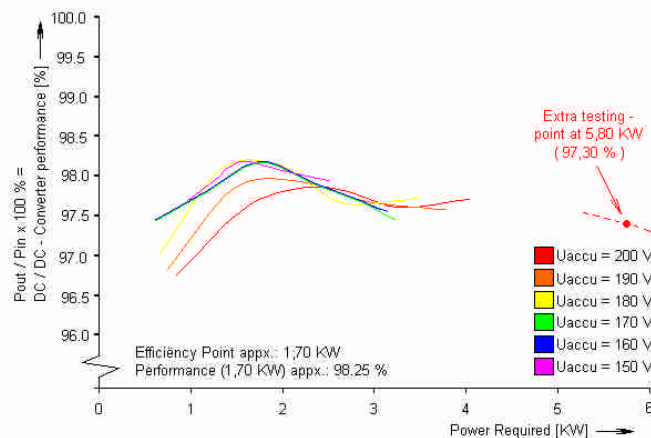
Recentelijk zijn er metingen verricht aan de “SAM” waaruit het volgende vermogenspatroon is ontstaan:



Figuur 23 Vermogenspatroon van een meting aan de “SAM”

Uit deze gegevens is eenvoudig te achterhalen dat het gemiddelde vermogen ligt op zo'n 5 KW. De negatieve 'pieken' (spikes) die in de figuur zijn te zien zijn ontstaan t.g.v. regeneratief remmen. In acht nemend dit gemiddelde vermogen, zijn er metingen verricht aan de converter.

Omdat er op de afdeling D.E.G.O. (“Duurzame Energie in de Gebouwde Omgeving”) van E.C.N. tijdelijk geen apparatuur aanwezig was waarmee het vermogen van de “DC / DC – converter” op hogere vermogens te testen dan 5,8 KW, is besloten de converter ook op dit vermogen te testen, waardoor er dus 0,8 KW méér aan vermogen werd gevraagd dan gemiddeld volgens de meting het geval was. Uit metingen bij “P.R.E.” is al gebleken dat bij een vermogensvraag van 8 KW, en een omgevingstemperatuur van 24 °C, bij een waterstroom van 0,5 dm³/min. er een dT van 15 °C ontstaat tussen in- en uitgaande - waterstroom van de converter stroombuis. De meting is voornamelijk interessant geweest voor de bepaling van de ‘systeemperformance’, waarvan hieronder het resultaat is te zien:

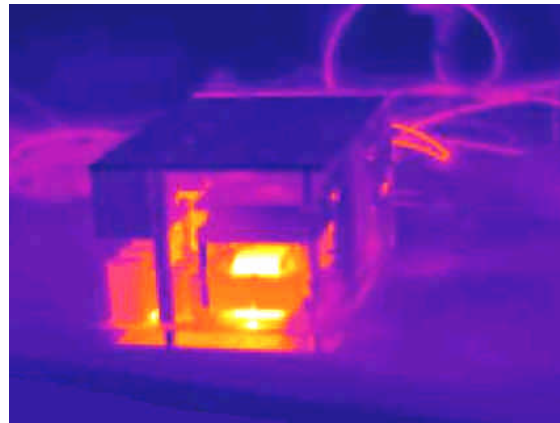
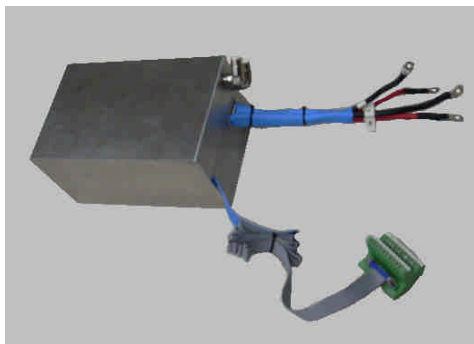
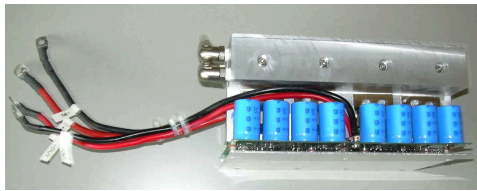


Figuur 24 Performance curves “DC / DC – converter”

Voor de meting is er gebruik gemaakt van drie “Δ - voedingen” (“Delta” voedingen) á 25 A bij een spanning van 90 V. Hiermee is een vermogen te realiseren van 6,75 KW (3 x 90 x 25), echter: bij de meting is een vermogensweerstand aan de uitgang van de converter slechts tot 5,8 KW te belasten. De koeling van de converter geschiedt d.m.v. een glycol gekoelde stroombuis en is in zijn geheel ondergebracht in een behuizing; beiden zijn tijdens de stage ontworpen.

Tijdens de meting bij 5,8 KW is er ook een thermografische foto gemaakt deze staat hieronder, tezamen met voornoemde ontwerpen.

In de thermografische, - (infrarood, -) foto is de "DC / DC – converter" te zien vanaf de achterzijde, en is goed te zien dat de trafo's het meest in temperatuur toenemen (c.a. 70 °C waardoor de figuur een lichtgele kleur geeft) bij een omgevingstemperatuur van c.a. 20 °C (donker blauw / paars in de figuur).



Figuur 25

Converter stroombuis en behuizing + thermografische foto

Hoofdstuk – 7 Overige systemen v/d (originele) "SAM"

Ter voorbereiding op hetgeen wat zo meteen aan regelstrategieën wordt besproken, zal er in dit hoofdstuk nog even kort worden ingegaan op de verschillende (ons nog resterende) deelsystemen van de "SAM" welke óók in het nieuwe concept aan de orde zijn.

§ 7.1 Het accupakket van de "SAM"

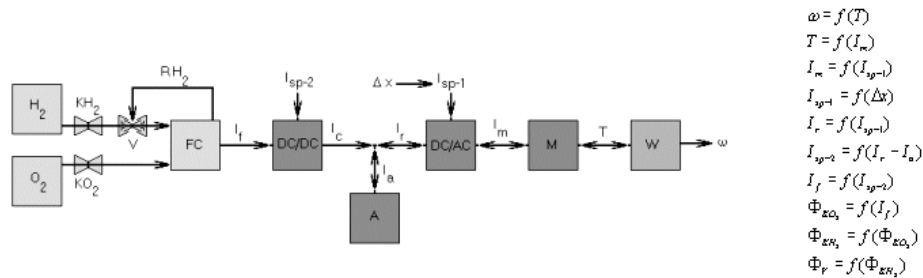
In de originele situatie van de "SAM" worden er 14 "Hawker" (type "Genesis") accu's á 26 Ah bij 12 V in de 'spine' ondergebracht, wat zal resulteren in een totale spanning van 168 V nominaal bij serieschakeling. Ook is er van dit type accu nog één extra in de 'spine' geplaatst welke als zgn. boordaccu dienst doet ter bekrachtiging van de instrumentatie in de 'cockpit'. Het totale gewicht van het accupakket komt hiermee op 150 Kg. In de nieuwe situatie zal er eveneens van 14 accu's voor tractie gebruik worden gemaakt én één boordaccu, maar hiervan zijn de tractie accu's vervangen door 14 accu's van 13 Ah, omdat uit meetdata en regelmodellen is gebleken dat dit voldoende is bij toepassing van een brandstofcel. Hiermee wordt, zoals ook in de inleiding al is genoemd, ruimte gewonnen voor de F.C.. Goed beschouwd zou men kunnen stellen dat de andere helft van de 'capaciteit' van de accu's in de F.C. gaat zitten.

§ 7.2 De bidirectionele "DC / AC – converter" van de "SAM"

De bidirectionele "DC / AC – converter" (ook wel "Tractie Controller" of "Drive" genoemd), is een elektrisch apparaat wat, zoals reeds in §3.1 kort is toegelicht, door middel van een stroomsetpoint afkomstig van de potentiometer van het gaspedaal, geregeld zal worden. Het stroomsetpoint is daarbij een 'maat' voor de momentane vermogensvraag uit de accu's. De bidirectionele drie fase tractie "DC / AC – converter" berust op het principe dat een gelijkstroom in een drie fase wisselstroom omgezet kan worden door, met een faseverschil van 120° beurtelings drie – meestal pulsbreedte gestuurde – afzonderlijke schakelingen te bekrachtigen, om zo een spanning te verkrijgen welke sterk lijkt op een drie fase wisselspanning. In de "SAM" wordt er van een 16 KW "DC / AC – converter" gebruik gemaakt die tevens als generator kan werken bij deceleratie (regeneratieve remacties waarbij het rempedaal ingetrapt is) om zo het accupakket bij te kunnen laden (zoals later zal gaan blijken: efficiëntie ≈ 98 %).

Hoofdstuk – 8 De drie regelstrategieën van de “SAM”

Het regelmodel van de “SAM”, zoals hieronder meer blokschematisch is weergegeven, zal worden besproken aan de hand van een zogeheten “Top - Down” structuur. In deze “Top – Down” hiërarchische structuur wordt het hoofdprobleem geleidelijk ‘vertaald’ naar minder complexe ‘deelproblemen’, die op hun beurt weer verder uiteengerafeld kunnen worden tot nog minder complexe ‘subproblemen’, tot een niveau wordt bereikt die men wenst. Vanuit causaal oogpunt kan men ervoor kiezen het regelmodel van vóór naar achter óf van achter naar voren te ‘doorlopen’, afhankelijk van wat men als een ‘actie’ respectievelijk ‘gevolg’ ziet. Wordt dit niet consequent volgehouden, dan ontstaan er problemen. Vanaf welke kant we de gehele regeling van het systeem van de “SAM” bekijken wordt in onderstaande figuur duidelijk:



Figuur 26 “E.C.N. concept aandrijving SAM blokschematisch”

Zoals de aan de rechter zijde staande onderlinge systeem parameter – relaties ons te kennen geven bekijken we het systeem dus van rechts naar links, m.a.w. het ‘gedrag’ van bijvoorbeeld de “W” (“wielaandrijving / overbrenging”) is het gevolg van het ‘gedrag’ van het daaraan voorafgaande deel-systeem “M” (“motor”), en het ‘gedrag’ van de “M” is op zijn beurt weer afhankelijk van de “DC / AC bidirectionele – converter” enz. In de nu volgende paragrafen zullen er drie verschillende regelstrategieën worden beschreven die als alternatief kunnen gelden voor de regeling van de deelsystemen door middel van de eerder genoemde “Micro Auto BoX” van “dSpace”. Het zal hierbij gaan om drie verschillende concepten, te weten:

- Regeling d.m.v. “DC / DC – converter” model;
- Regeling d.m.v. vermogensbalans model;
- Regeling d.m.v. accuspanning model.

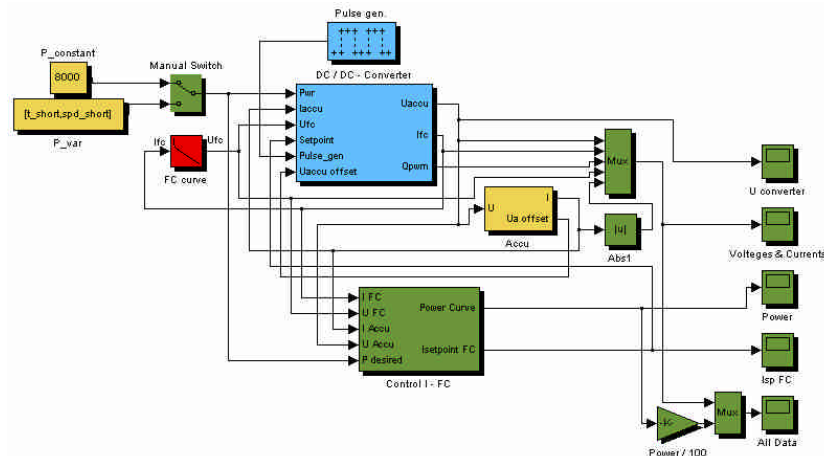
Het éérste regelconcept zal ons een regelstrategie laten zien waarmee wordt gepoogd de werkelijke “DC / DC – converter” synchroon te laten verlopen met een software model van “Simulink”, waardoor het werkelijke model door middel van een P.I.D. controller – lus bijgeregeld zal moeten worden.

Het tweede alternatief laat ons een regelstrategie zien waarbij er gebruik wordt gemaakt van zoveel mogelijk systeemp parameters, die tezamen in een vermogensbalans resulteren. Met deze vermogensbalans kan het systeem vervolgens aangestuurd worden.

Het derde, en tevens laatste, regelconcept laat ons een regeling zien waarbij uitsluitend van accuspanning en stroom gebruik gemaakt zal worden voor de regeling van het systeem.

§ 8.1 Éérste regelconcept, d.m.v. “DC / DC – converter” model

Het totale systeem van de “SAM” kunnen we regeltechnisch, bij een regelconcept d.m.v. een “DC / DC – converter” model, voorstellen zoals in onderstaande figuur, met uitsluitend regelparameter “P”.



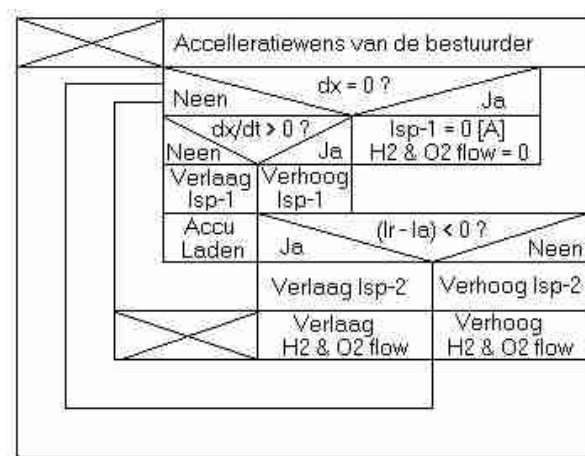
Figuur 27 Totale “DC / DC – converter” regelmodel “

De blokken waarin het regelsysteem van de “SAM” zal worden onderverdeeld zijn hieronder samengevat.

- Belasting: “Accu” in combinatie met “P_constant” of “P_var”;
- Gelijkstroom conversie: “DC / DC – converter”;
- Voeding: “Fuelcell” (“Brandstofcel”);
- Overigen: “Setpoint Control”.

In deze volgorde zullen we de afzonderlijke deelsystemen ook bespreken.

Ter verduidelijking van de regelstrategie van de “SAM” volgt hieronder in een zgn. “N / S - diagram” (“Nassi / Schnederman - diagram”) die de sterk vereenvoudigde proces – flow vertegenwoordigd:



Figuur 28

“Nassi / Schnederman - diagram”

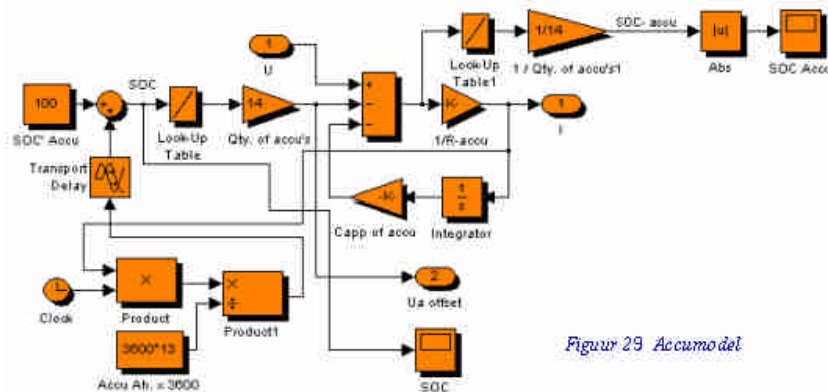
Voor de totale regeling moet er opgemerkt worden dat in het regelmodel de “DC / AC bidirectionele – converter” voorlopig nog even wordt voorgesteld als een constante vermogensvraag (P_constant) dan wel variabele vermogensvraag (P_var, vanuit recente testgegevens aan de “SAM”), wat naar keuze kan worden ingesteld met de groene “Manual Switch” linksboven in het model. Men zou kunnen stellen dat deze vermogens het ‘gedrag’ van alle deelsystemen ná de accu vertegenwoordigen. Hierdoor komt de bespreking van de systemen *voorbij* de accu te vervallen, en zullen we in de nu volgende paragraaf (§ 8.1.1) meteen bij het regelmodel van de accu aankomen.

De brandstofcel die, omwille de gehanteerde actie / gevolg structuur, eigenlijk na de DC / DC – converter moet worden besproken, wordt hier eenvoudig weergegeven door een spanning / stroom relatie (vermogenscurve) – hier in het rood afgebeeld – en in het model gesitueerd onder de voornoemde schakelaar. Hiermede rest ons, na bespreking van de converter, voorlopig alléén nog het gedeelte van de signaalprocessing (“Setpoint Control”).

N.B.: De “P_var” en “FC curve” worden in het regelmodel verkregen door twee matrices welke tijd respectievelijk stroom afhankelijk zijn. Beiden zijn ondergebracht in de “Workspace” van “Matlab”.

§ 8.1.1 Modelleren van de accu

Het regelmodel van de accu staat hieronder weergegeven.



Figuur 29 Accu model

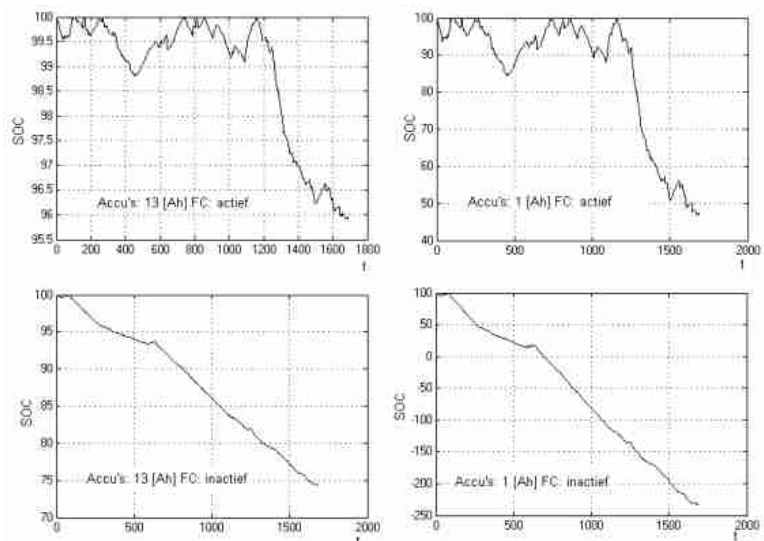
Aan de meest linkerzijde van dit model vinden we een constante waarde die de “SOC” (“State Of Charge” of ladingstoestand) van de accu weergeeft. We gaan in bovenstaande voorbeeld dus uit van een simulatie die begint bij een volledig geladen accu (SOC = 100%). De accuspanning is afhankelijk van de SOC, die op zijn beurt weer afhankelijk is van de accustroom, en kan worden gedefinieerd als de SOC op $t = 0$, in mindering gebracht met de stroom geïntegreerd naar de tijd over een tijdsinterval van t_1 tot t_2 in verhouding tot het product van het Ah getal en 3600 (aantal seconden per uur):

$$SOC(t) = SOC(0) - \int_{t_1}^{t_2} \frac{I}{3600 \cdot Ah} dt \quad [\%]$$

Omdat de spanning / SOC afhankelijkheid $\{U_{accu} = f(SOC_{accu})\}$ bekend is en, zoals men boven kan zien, in een zgn. “Look – Up Table” is ondergebracht, kan hieruit direct de momentane accuklemspanning worden gehaald bij een bepaalde SOC(t). Samen met de spanningsval over de ‘capaciteit’ van de accu zal deze van de

uitgangspanning van de “DC / DC – converter” worden afgehaald. Dit resulteert in een totale spanningsval over de accu die, na deling van de serieweerstand van het totale accupakket, een stroom dóór het accupakket als gevolg heeft.

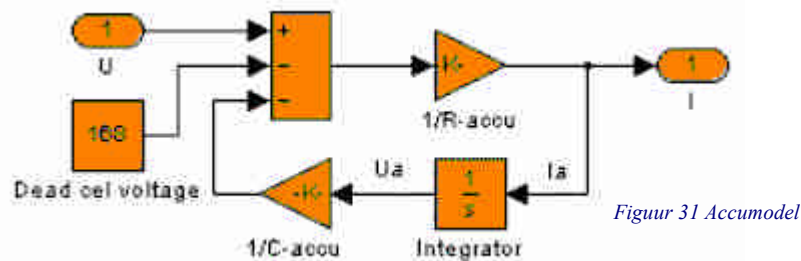
De condensator is, in het complexe Laplace – frequentiedomein voor te stellen als een $C \times s$ operator ($s = j \cdot \omega + \sigma$), en voor de stroom geldt $I = -C \cdot U \cdot s$ omdat: $U = 1 / C \cdot 1 / s$. Nevenstaande figuur geeft overigens te kennen dat we zelfs met 1 Ah accu’s kunnen volstaan (F.C. mag dan niet falen).



Figuur 30 SOC oude / nieuwe situatie bij FC- actief / inactief

§ 8.1.2 Modelleren van de accu

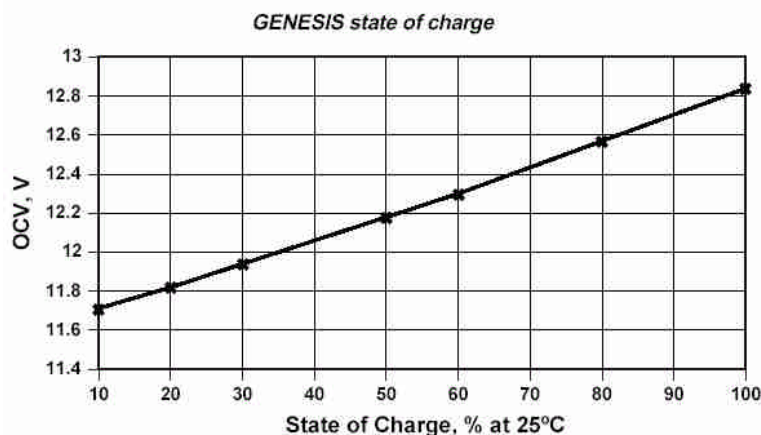
Verder vereist het regelmodel van de Accu nog wat nadere uitleg.



Een accu heeft namelijk 3 eigenschappen:

- Er is een offset voltage aanwezig ("Dode cel spanning" genaamd);
- Er is een capaciteit aanwezig in de accu, vergelijkbaar met dat van een condensator;
- Er is een interne weerstandswaarde.

De fabrikant van de voor "SAM" toegepaste accu's is "Hawker", en deze geeft voor de Accuspanning als functie van de S.O.C. ("State Of Charge") van de accu, de volgende grafiek:



Voor de richtingscoëfficiënt van deze grafiek kunnen we het volgende zeggen: $dy/dx = (12,85 - 11,7)/(100-10) = 0,0127$. Hierdoor geldt: dat voor iedere percentuele toename van de S.O.C., de celspanning 12,7 [mV] zal stijgen. Aangezien een "Genesis" accu 6 cellen heeft, is de celspanning dus 1/6 van de momentane totaalspanning over de accu. Indien we S.O.C. = 10 % als zijnde 'leeg' veronderstellen (dan geldt hiervoor een spanning van 11,7 volt, waardoor de celspanning 2,116 volt is, en bij volledig geladen accu's geldt dan 12,85 volt, waarbij de celspanning dan 2,1417 volt is). Hierdoor zal gelden:

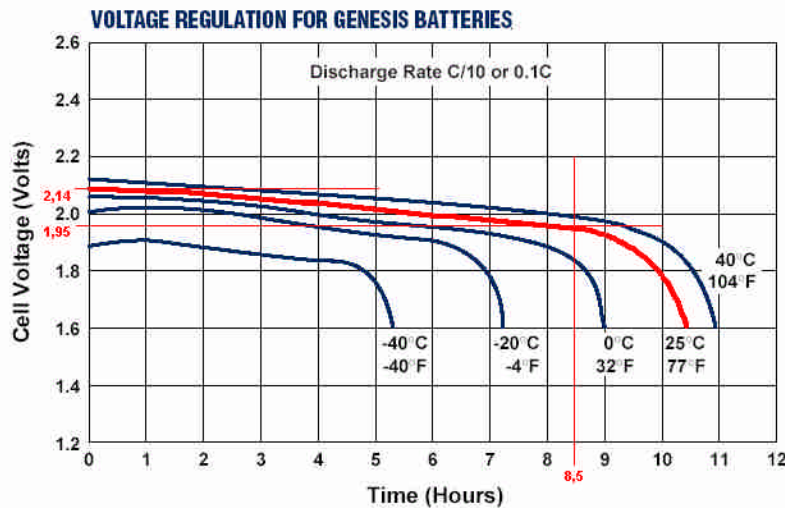
$$U_{\text{tot. accupakket}}^{\text{max}} = 2,1417 \frac{[V]}{\text{cel}} \cdot 6 \frac{\text{cellen}}{\text{accu}} \cdot 14 \text{ accu's} \approx 180,0 [V], \text{ dit is de maximale spanning over het totale accupakket.}$$

Voor de minimale celspanning zal gelden:

$$U_{\text{tot. accupakket}}^{\text{min}} = 2,116 \frac{[V]}{\text{cel}} \cdot 6 \frac{\text{cellen}}{\text{accu}} \cdot 14 \text{ accu's} \approx 163,8 [V], \text{ dit is de minimale spanning over het totale accupakket.}$$

Aangezien de offset spanning van de condensator maar 2,5 % hoger ligt, is er besloten om ook een offsetspanning van 168 [V] voor het totale accupakket te hanteren, deze waarde zijn we reeds tegen gekomen.

Voor dit alles is een omgevingstemperatuur van 25 [°C] als aannemelijk geacht. Ook de onderstaande figuur bevestigt nog eens dat de celspanning (bij 25 [°C] omgevingstemperatuur) varieert tussen de 1,95 en 2,14 [V] binnen een tijdsbestek van 8,5 uur (dat is praktisch méér dan voldoende).



Figuur 33 Accu karakteristiek

De capaciteit van het totale accupakket is als volgt te bepalen:

$$C = \frac{dQ}{dU} = \frac{13 [Ah] \cdot 3600 [\text{sec}/h]}{180,0 - 163,8} = 2889 [F]$$

De interne accuweerstand is bij een volgeladen accu 8,5 mΩ:

GENESIS PRODUCT FAMILY (All capacities at 10 hr. rate 25°C to 1.67 vpc)					DIMENSIONS				
Product (capacity)	Part Number	Internal res. of fully charged battery mΩ @ 25°C	Nominal short circuit current for charged battery	Length in. (mm)	Width in. (mm)	Height in. (mm)	Weight lb. (kg)	Brass Terminal (metric)	
G13EP (13Ah)	0770-2007	8.5	1,400A	6.910 (175.51)	3.282 (83.36)	5.113 (129.87)	10.8 (4.9)	M6 w/ss hardware	
G13EPX (13Ah)	0770-2003	8.5	1,400A	6.998 (177.75)	3.368 (85.55)	5.165 (131.19)	12.0 (5.4)	M6 w/ss hardware	
G16EP (16Ah)	0769-2007	7.5	1,600A	7.150 (181.61)	3.005 (76.33)	6.605 (167.77)	13.5 (6.1)	M6 w/ss hardware	
G16EPX (16Ah)	0769-2003	7.5	1,600A	7.267 (184.58)	3.107 (78.92)	6.666 (169.32)	14.7 (6.7)	M6 w/ss hardware	
G26EP (26Ah)	0765-2001	5.0	2,400A	6.565 (166.75)	6.920 (175.77)	4.957 (125.91)	22.3 (10.1)	M6 w/ss hardware	
G26EPX (26Ah)	0765-2003	5.0	2,400A	6.636 (168.55)	7.049 (179.04)	5.040 (128.02)	23.8 (10.8)	M6 w/ss hardware	
G42EP (42Ah)	0766-2001	4.5	2,600A	7.775 (197.49)	6.525 (165.74)	6.715 (170.56)	32.9 (14.9)	M6 w/ss hardware	
G42EPX (42Ah)	0766-2003	4.5	2,600A	7.866 (199.80)	6.659 (169.14)	6.803 (172.80)	35.1 (15.9)	M6 w/ss hardware	
G70EP (70Ah)	0771-2001	3.5	3,500A	13.020 (330.71)	6.620 (168.15)	6.930 (176.02)	53.5 (24.3)	M6 w/ss hardware	
G70EPX (70Ah)	0771-2003	3.5	3,500A	13.020 (330.71)	6.620 (168.15)	6.930 (176.02)	56.0 (25.4)	M6 w/ss hardware	

Figuur 34 "Hawker" accu's

Bij een volledig ontladen accu kan de interne weerstand tot wel 84 x groter zijn, maar gemiddeld genomen wordt 360 mΩ, zoals reeds toegelicht, aannemelijk geacht.

§ 8.1.3 De "DC / DC boost – converter"

Gelijkstroom of "DC / DC boost – converters" zijn er in vele uitvoeringsvormen, zoals bijvoorbeeld een "fly – back converter", "geschakelde - koppeling", "cascade diode schakeling" en "PWM - boost converter". De laatst genoemde, de "PWM - boost converter" ("Pulse Width Modulated boost - converter, ofwel: "Pulsbreedte - gemoduleerde omvormer") is van het soort dat wij in dit deelverslag zullen bespreken, de andere typen zijn namelijk minder efficiënt gebleken en vallen daarmee buiten de opzet van dit verslag.

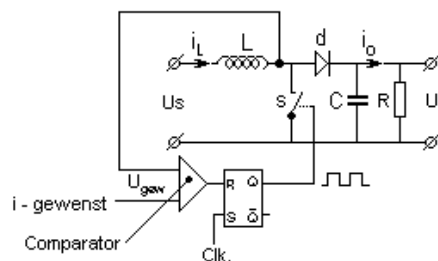
Een "DC / DC boost – converter" is niets anders dan een apparaat wat een gelijkspanning naar een hoger niveau brengt. Regeltechnisch zou men dus, in meest eenvoudige vorm, kunnen volstaan met een eenvoudige "Gain" met een bepaalde versterkingsfactor, zoals in onderstaande figuur is weergegeven:



Figuur 35 Gain

N.B.: gemakshalve zullen we "DC / DC boost – converter" voortaan "converter" noemen.

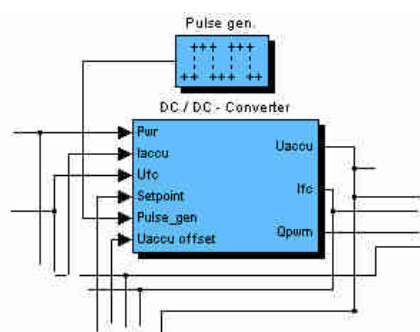
In werkelijkheid is de werking van de converter niet zo eenvoudig voor te stellen, omdat we stromen (I) en spanningen (U) moeten bewaken / regelen (vermogens dus, want: $\text{vermogen} = P = U \times I$). Ook zijn we elektrotechnisch genooddaakt om een bepaald energieniveau ($= Q = P \times t$) aan de ingang van de converter tijdelijk op te slaan, en deze vervolgens op een later tijdstip bij ditzelfde niveau op te tellen (een zogeheten "superpositie"), wat het geheel al een stuk gecompliceerder maakt. De PWM gestuurde converter is, in een elektrisch schema, voor te stellen als figuur hieronder.



Figuur 36

"Boost Converter" met "RS-FF" regeling

De pulsbreedte van het door de PWM afgegeven signaal (hier eenvoudig voorgesteld als een oscillator en een SR – FF), bepaald de dI/dt dóór de spoel en zal, als de stroom door de spoel boven de gewenste waarde komt, de schakelaar openen en anders sluiten. De weerstand "R" stelt de belasting aan de uitgang van de converter voor, en representeert in dit geval de accu en de "DC / AC bidirectionele-converter (en al wat daar achter komt). We zullen nu dieper ingaan op de werking van deze converter.

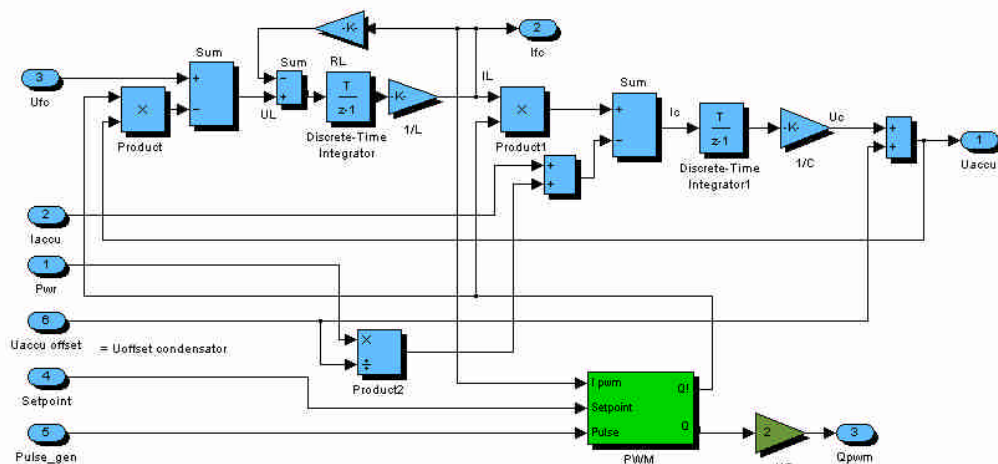


Figuur 37

Blokschema "Boost Converter" ("Toplevel")

De "pulse generator" is hier buiten het 'blok' van de converter aangebracht, om zo eenvoudig de waarde hiervan aan te kunnen passen in "Simulink". De ingestelde waarde van deze oscillator ligt in de regel op c.a. 21 KHz. In een lager gelegen 'level' kunnen we ons deze converter voorstellen als in onderstaande figuur.

De modellering van de converter in “Simulink”:

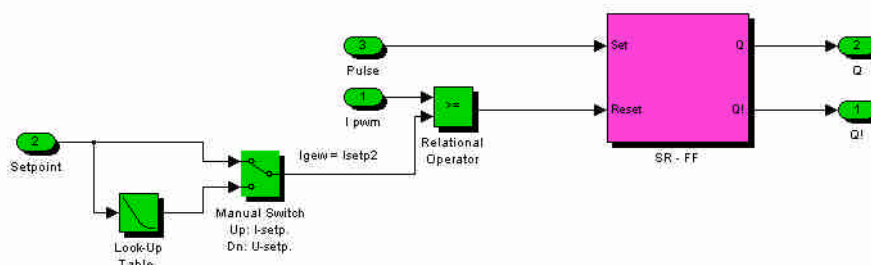


Figuur 38 Blokschema "Boost Converter"

Een spoel kan in het complexe Laplace – frequentiedomein worden weergegeven als $1/(L \cdot s)$, wat in bovenstaande figuur (linksboven) is weergegeven met $T/(z-1) \times 1/L$ om een snellere simulatie te verkrijgen (T is hierbij de periodetijd van de PWM; deze is echter niet $1/21000$ maar $1/2100000$ omdat de actieve periodetijd of “duty – cycle” van de “oscillator” in ons geval 1% is). De teruggekoppelde “Gain” over de spoel is vanwege de ohmse zelfinductie verliezen (koperverliezen en hysteresis - verliezen) in de spoel. Een condensator (rechtsboven) is, zoals eerder bij de accu al is beschreven, voor te stellen als een $C \times s$ operator, en indien we van een stroom een spanning willen maken $1/(C \times s)$ {hier voorgesteld als een $T/(C \times (z-1))$ }, wederom voor het verkrijgen van een snellere simulatie} want spanning is het product van de reciproque capaciteit en stroom geïntegreerd naar de tijd.

Links en rechts van de spoel vinden we de twee schakelende elementen die respectievelijk de schakelaar en de diode moeten voorstellen (aangeduid met een product blok waarbij het product "0" is als de PWM een logische "0" aan de zgn. inverterende uitgang "Q!" geeft). De schakelaar zal dan openen of sluiten, en de diode zal geleiden of sperren. Verder wordt aan de uitgang de condensatorspanning weer naar de ingang van het circuit teruggekoppeld, waarmee de vereiste condensatorspanning tezamen met de door de belasting vereiste condensatorspanning (ná superpositie) resulteren in een spoelstroom die een referentie stroom geeft voor de PWM.

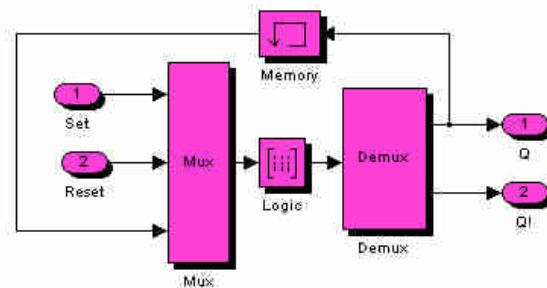
Deze referentiestroom zal aan de ingang van de PWM worden vergeleken met de (nog) benodigde stroom aan de uitgang van de regeling (in rekening genomen de stroom door de condensator), wat in onderstaande PWM circuit terug is te zien.



Figuur 39 Blokchema PWM

Zoals gezegd kan het setpoint een spanning dan wel stroom set-point zijn, dit kan met de schakelaar worden geregeld. Nu rest ons nog een beschrijving van de toegepaste SR – FF in de PWM ...

De SR – FF van dit model kan als volgt voorgesteld worden:



Figuur 40 Blokschema SR - FF

Bij een “flip-flop” schakeling is de situatie aan de uitgang van de schakeling afhankelijk van de in de tijd hieraan voorafgaande combinaties vaningangssignalen. In ons geval zullen we (naast de bestaande D en J/K – Flip – Flop schakelingen) uitsluitend de SR – FF (“Set / Reset – Flip – Flop”) schakeling bespreken. Een FF - schakeling heeft als het ware een geheugen, en vandaar ook de naam geheugenschakeling. Het gedrag van een “flip-flop” schakeling zouden we kunnen vergelijken met dat van een tuimelschakelaar: eenmaal aangezet blijft de schakelaar aan totdat de schakelaar wordt uitgezet. Een “flip-flop” schakeling heeft twee stabiele toestanden, namelijk: de toestand waarin de uitgang “Q” ‘hoog’ is, ofwel: logisch één, en de situatie waarin de uitgang “Q” ‘laag’ is, of logisch nul. De inverterende uitgang “Q!” is dan steeds het ‘tegenovergestelde’ van de niet – inverterende uitgang “Q” (“Q” hoog dwz.: “Q!” laag en vice – versa). De “SR – FF” bevindt zich in de “1” toestand, als “Q” ‘hoog’ (logisch “1” is), en in de “0” toestand als “Q” ‘laag’ (logisch “0” is).

Een “1” op de “S” (“Set”) ingang brengt de “SR – FF” in de “1” toestand (“Q” = 1 en “Q!” = 0). Wanneer het signaal “S” ‘wegvalt’, bijvoorbeeld doordat “S” nul wordt of doordat deze niet meer aan het minimaal benodigde logische spanningsniveau voor een logische “1” (meestal c.a. 5 [V]) voldoet, dan ‘onthoudt’ de FF deze toestand. Slechts een “R” (“Reset”) zal, er van uitgaande dat “Q” in eerste instantie logisch “1” was, ervoor zorgen dat “Q” logisch “0” wordt. Hierbij zal “Q” nul blijven zolang “R” actief (logisch “1” is). In het geval dat “S” en “R” gelijktijdig ‘hoog’ waren zal er een onbepaalde en daarmee onvoorspelbare uitgangssituatie ontstaan (ook wel “don’t care” situatie genoemd).

De “toestandstabel” van deze FF schakeling kunnen we als volgt definiëren:

Toestandstabel SR – FF:

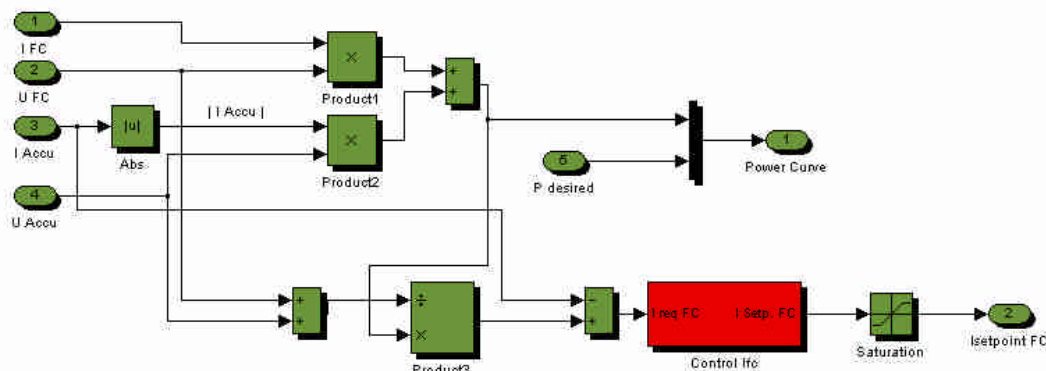
Sn	Rn	Qn+1
0	0	Qn
0	1	0
1	0	1
1	1	X (onbepaalde of “don’t care” situatie)

Met de “n” situatie wordt bedoeld: de situatie vóór het omschakelen van “R” en / of “S”, en met de “n+1” situatie wordt bedoeld de situatie ná het ‘activeren’ van “S” en / of “R”.

Verder moet er nog opgemerkt worden dat er in het totale regelcircuit van de converter, een offset-spanning (gelijk aan de dode celspanning van de accu) wordt gegeven voor de condensator, zodat het doorschot van de regeling afneemt. Ook komt in dit schema naar voren dat de vereiste belastingsspanning samen met de accuspanning van de condensatorspanning wordt afgehaald, dit klopt ook, want de spanning over de spoel is de som van accu, belasting en condensatorspanning.

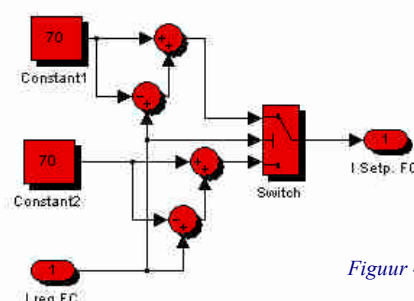
§ 8.1.4 “Setpoint control” van de “DC / DC – converter”

Het “Control IFC” blok (grote groene blok onderin het bovenste ‘level’ van het regelmodel) ziet er in het lager gelegen level als volgt uit:



Figuur 41 Setpoint control “DC / DC – converter”

Hiermee wordt er een power-curve aan de uitgang gegenereerd en een “ I_{sp} ” (stroom setpoint) voor de converter (wat naar behoefte, zoals vermeld, ook een “ U_{sp} ” kan worden). Het rode blok heeft een belastingspunt instelling van de F.C. van 70 A (bij c.a. 100 V) ingesloten, zodat vanaf deze waarde de regeling begint.

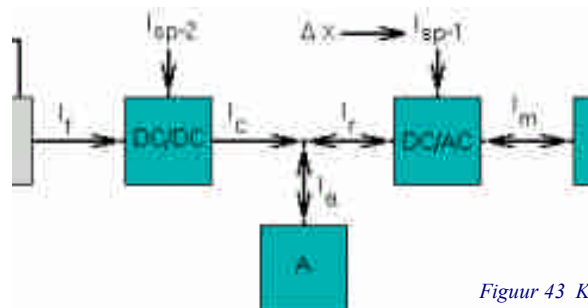


Figuur 42 Regeling “offset”

In de nu volgende paragraaf zal kort en bondig het systeemgedrag even ‘onder de loep’ worden genomen, in de vorm van een “Matlab” - simulatie in “Simulink”.

§ 8.1.5 Systeemgedrag “Converter” model en “SAM”

Uit een eerder besproken blokschema kunnen we het volgende onderdeel naar voren halen:

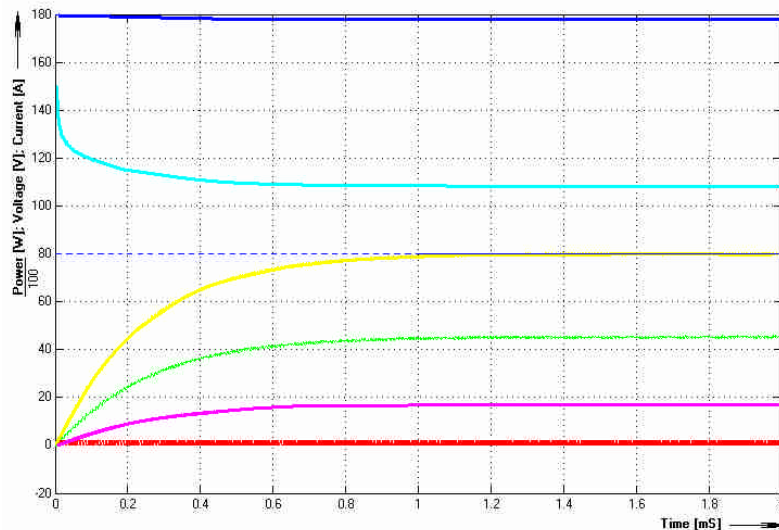


Figuur 43 Knooppunt v/h regelmodel

Het stroom – setpoint (I_{sp-1}) van de bidirectionele “DC / AC – converter” zal bepalen welke stroom er ‘verlangd’ wordt van de daaraan voorafgaande schakeling van accu en “DC / DC – converter”.

Hierbij zal dus gelden dat I gevraagd ($I_r = I_{\text{required}}$) = I accu (I_a) + I converter (I_c). $I_{\text{sp-2}}$ voor de converter is gelijk aan de I van de FC (I_f) {het rendement van de converter even 100 % gesteld i.p.v. c.a. 95 %}, en hangt op zijn beurt weer af van de momentane SOC van de accu. Op deze stroom 'balans' is de eigenlijke werking van het regelmodel van het "DC / DC converter" regelmodel gebaseerd, m.a.w.: het regelmodel is stroom gestuurd.

Nu zal het systeemgedrag van de accu en converter worden besproken. Om een indicatie te krijgen hoe het systeemgedrag van het regelmodel is bij een vermogensvraag van de "SAM" van 8 [KW], bekijken we de onderstaande figuur.



Figuur 44 Responsie converter model

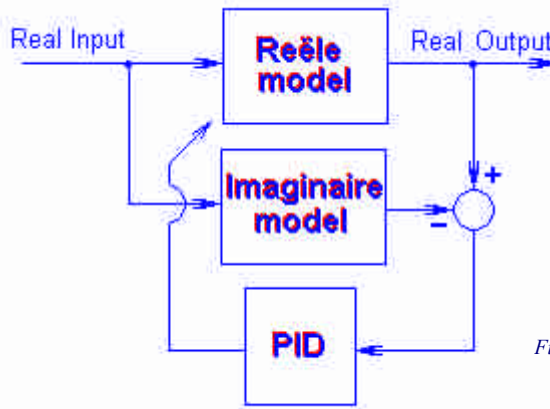
De vermogensvraag van de "SAM" is in deze figuur met dunne (onderbroken) donkerblauwe lijn weergegeven (om alle belangrijke systeemresponsies in één figuur af te kunnen drukken is, gemaximaliseerd, het vermogen opgeschaald tot 1/100e deel). De dikke gele lijn geeft het gedrag van het regelsysteem bij deze vermogensvraag (uiteraard is ook deze vermogensvraag opgeschaald met 1/100^e). Het vermogen wat nodig is om aan de vereiste vermogensvraag tegemoet te komen wordt verdeeld onder de 'capaciteit' van de "accu" (op dat moment) en de 'capaciteit' van de F.C. (op dat moment). Waarbij beweerd kan worden dat de "SAM" constant door de F.C. wordt aangedreven met de "accu" als buffer om o.a. versnellingspieken 'op te vangen' en dan wel als 'buffer' fungeert om het de 'traagheid' van de F.C. te compenseren.

De lichtblauwe lijn geeft het spanningsniveau van de FC en de groene lijn geeft het stroomniveau van de F.C.. Bij een vermogensvraag van 8 KW is er dus een FC spanning van c.a. 108,00 [V], bij een stroom van c.a. 45 ½ [A]. Wetende dat de accuspanning (op dat moment) c.a. 178,00 [V] is (in de grafiek helemaal bovenin met een dikke donkerblauwe lijn aangegeven), zal dit resulteren in een vereiste accustroom van: $I_{\text{accu}} = \{(8000 - (108 \times 45 \frac{1}{2})) / 178\} \approx 17$ [A], wat in de grafiek met een dikke paarse lijn ook te kennen wordt gegeven. De dikke rode, ogenschijnlijk ononderbroken, lijn in de grafiek geeft (geschaald met factor 5) de pulserende uitgangsspanning van de PWM ("Pulse Width Modulator"). Vanwege de hoge schakelfrequentie van 21 KHz (bij een "duty – cycle" van 1%) is zelfs in dit korte meetbereik van slechts 2 [mS] het schakel 'gedrag' hiervan nauwelijks zichtbaar. Wel kunnen we zien dat er, naarmate het stroomniveau van de F.C. geleidelijk oploopt (dikke groene lijn), steeds meer geschakeld zal gaan worden door de PWM.

Uiteraard zal de vermogensvraag van de "SAM" in de tijd sterk fluctueren, doch hier is uitgegaan van een maximale en constante vermogensvraag van 8 KW, waardoor we min of meer met een z.g.n. "worst case" situatie te maken hebben.

§ 8.1.6 Ondervonden problemen bij dit regelmodel

Bij het modelleren van de converter is er aanvankelijk gedacht aan een soort van PID regeling van de totale DC / DC – converter. Dit heeft voorgaande hoofdstuk ons ook te kennen gegeven. Hierbij was het de bedoeling om onderstaande regelstrategie toe te passen.



Figuur 45 PID regeling

Een reëel signaal zal door de “Human Operator” vrijwel direct (elektrisch) aan de “DC / DC – converter” worden doorgegeven, en tevens aan de “MABX”. Het verschil tussen de werkelijke waarde (uitgang reële model) en irreële waarde (uitgang imaginaire model) zal door een PID controller worden bijgeregeld, en worden aangeboden als nieuwe ‘input’ voor het werkelijke model.

In éérste oogopslag lijkt dit een eenvoudige oplossing, maar in de praktijk wordt het wel héél gecompliceerd. In bovenstaande geval zal er namelijk een software model moeten worden ontworpen welke theoretisch nagenoeg exact dezelfde eigenschappen heeft als het werkelijke model, waarbij de kleine afwijking wordt ‘bijgeregeld’.

Al snel zou blijken dat bij het opzetten van het regelmodel de werking van de converter op zichzelf wel redelijk goed functioneerde, maar de simulatie van enkele milliseconden duurde dan wel bijna 5 seconden vanwege de hoge schakelfrequentie van de PWM. Echter, werd de schakelfrequentie een veelvoud lager gekozen, dan nam de afwijking tussen input en output met dezelfde factor toe, dat zou de PID regeling vervolgens zéér ‘zwaar’ en onbetrouwbaar maken.

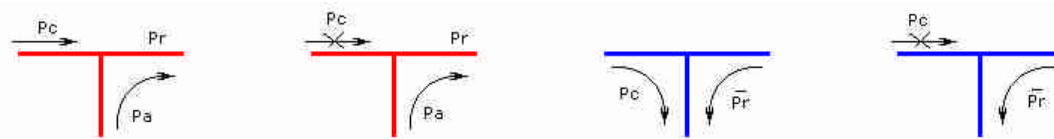
Een andere, wat meer praktische, insteek voor de regeling van de converter en F.C. bleek hiermee dus noodzakelijk. Er is toen gekozen voor een regelstrategie waarbij, met de snelheid van de “SAM” als ‘input’ signaal van de regeling -in combinatie met verschillende systeemvariabelen- een vermogensbalansvergelijking wordt opgesteld, om zo een vereiste vermogensvraag van de F.C. te genereren (in de vorm van setpoints).

In het de nu volgende hoofdstuk zal het regelconcept van de “vermogensbalansvergelijking” nader worden toegelicht.

§ 8.2 Tweede regelconcept, d.m.v. vermogensbalansvergelijking

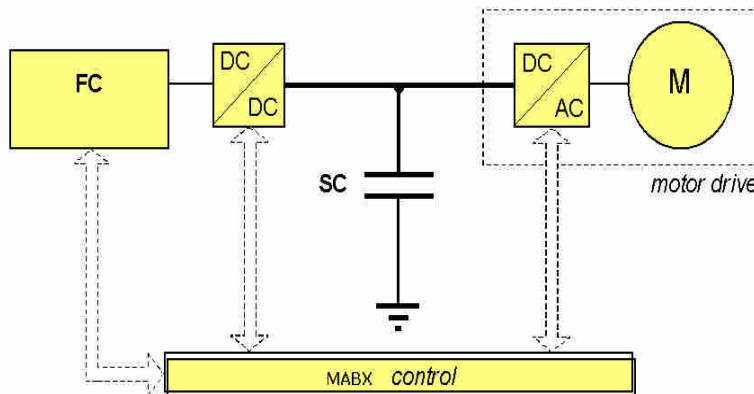
Zoals figuur 5 en 26 ons reeds hebben laten zien kunnen we stellen dat het door de “Human Operator” gewenste motorkoppel evenredig is met Δx , en zo ook met ΔR en ΔI_{sp-1} , ervan uitgaande dat we hier te maken hebben met een lineaire potentiometer. Als we $\Delta x = f(t)$ weten alsook $P_r = f(t)$ en we weten het regelbereik van de potentiometer, dan kunnen we $P_r = f(t) = f(R) = f(I_{sp-1})$ eenvoudig uitschrijven. Uiteraard is het dan net zo goed mogelijk om $R = f(P_r)$; $U_{sp-1} = f(P_r)$ alsook $\Delta x = f(P_r)$ te noteren. Weten we $P_r(t)$ en delen we deze door de momentane accuspanning, en we verminderen deze uitkomst met de momentaan beschikbare stroom in de accu {die op zijn beurt weer afhankelijk is van SOC(t) van de accu} dan weten we de vereiste stroom uit de stack en kunnen we dit ‘transformeren’ naar een I_{sp-2} wetende dat er een vaste verhouding zit tussen I_{sp-2} en I_r .

Bekijken we het knooppunt van het regelmodel van de “SAM”, in bovengenoemde figuren, dan kunnen er, volgens de wet van “Kirchhoff”, eigenlijk maar vier verschillende situaties van vermogens vraag en aanbod worden aangetroffen, namelijk:



Figuur 46 Stroombalans “SAM”

In de in rode kleur aangegeven situaties is er sprake van een stroomvraag, en in de blauwe kleur aangegeven situaties is er sprake van een zgn. ‘vermogensoverschot’. In het eerste geval is de SOC van de accu voldoende om, samen met het vermogen van de FC, aan P_r tegemoet te komen. In het tweede geval is er sprake van een ontladen van de accu (ongeacht de SOC) zonder aanspreken van de F.C. hetgeen het geval kan zijn na het direct starten en accelereren van de “SAM”. In het derde geval is er sprake van een vermogensoverschot van de “SAM”, en zal de accu, indien noodzakelijk in combinatie met de FC, worden bijgeladen; dit is een regeneratieve remactie. In het laatste geval zal de accu alléén door de “SAM” worden geladen. Dit zijn eigenlijk de ‘voorwaarden’ die de “MABX” van “dSpace” impliciet regelt volgens een “real – time” regeling. Hiermee kan het regelmodel, in de lijn van de zojuist genoemde figuren 5 en 26, ook als volgt worden weergegeven:



Figuur 47 Regelmodel “SAM”

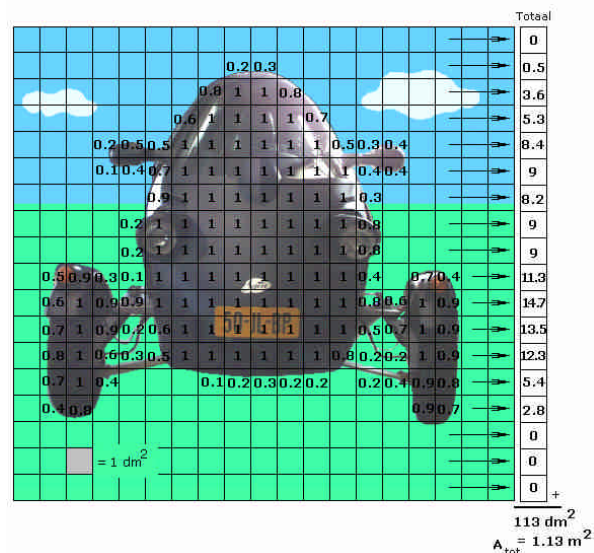
Om op ieder tijdstip “t” (momentaan) het vermogen te kunnen ‘vertalen’ in setpoints voor de converter en F.C. kunnen we gebruik maken van een vermogensbalansvergelijking:

$$P_{tot(h)} = \frac{C_d \cdot 0,5 \cdot r \cdot v^3 \cdot S + m \cdot a \cdot v + m \cdot g \cdot m \cdot v + P_0}{(h_{(dc/ac+m+T)} \cdot h_{dc/dc}) / 1 \cdot 10^4} [W]$$

De onbekende parameters in deze betrekking zullen we nu gaan bepalen ...

§ 8.2.1 Bepaling luchtweerstandscoefficiënt van de "SAM"

De luchtweerstandscoefficiënt van het frontale oppervlak van de "SAM" kunnen we berekenen door een raster te plaatsen over een foto van het vooraanzicht:



Figuur 48

Frontaal opp. "SAM"

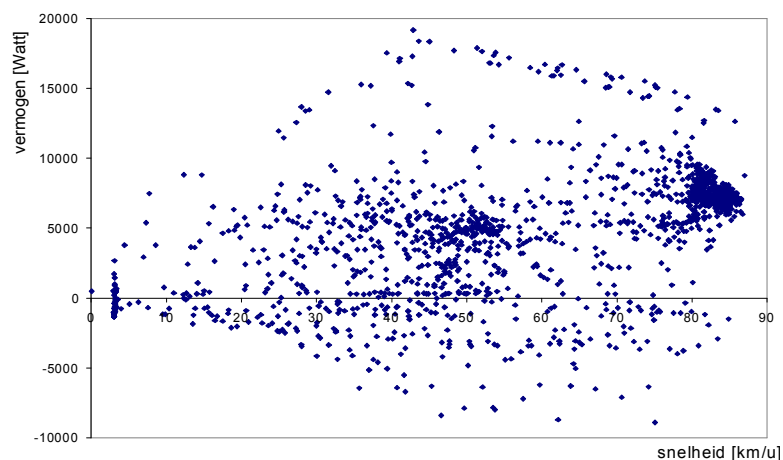
Vervolgens kunnen we de vermogensbalans - vergelijking op gaan stellen wetende dat er volgens een dynamische situatieschets zal gelden dat:



Figuur 49

Krachten op de "SAM"

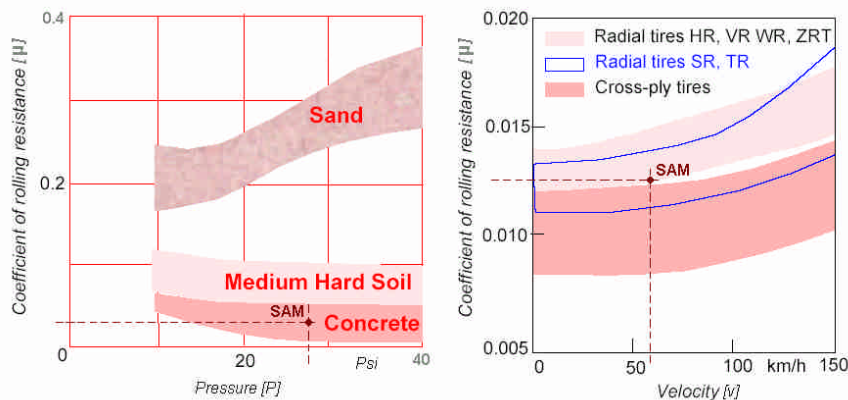
Hierbij is F_d de "drag" weerstand (luchtweerstandskracht), F_m is de kracht benodigd om de massa (m) van de "SAM" een versnelling te geven, en F_f is de "frictie" – kracht, en deze is afhankelijk van de wrijvingsweerstandscoefficiënt van het wegdek waar de "SAM" scooter op rijdt. De wrijvingsweerstandscoefficiënt van het wegdek is te achterhalen m.b.v. onderstaande grafiek.



Figuur 50

Vermogen v.s. snelheid van de "SAM"

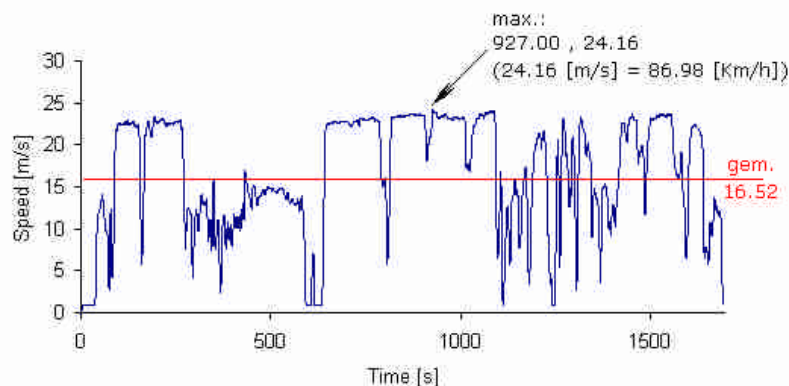
Uit bovenstaande grafiek is te bepalen dat de gemiddelde 'cruise' snelheid ligt op c.a. 60 Km/h. De bandenspanning van de "SAM" ligt, na meting, tussen de 1,8 á 2,0 Bar [26 á 29 Psi]. Met zojuist genoemde gegevens kunnen we uit de onderstaande grafieken eenvoudig de wrijvingsweerstandcoëfficiënt van het wegdek (asfalt) benaderen voor de "SAM".



Figuur 51 Wrijvingsweerstandcoëfficiënt van asfalt

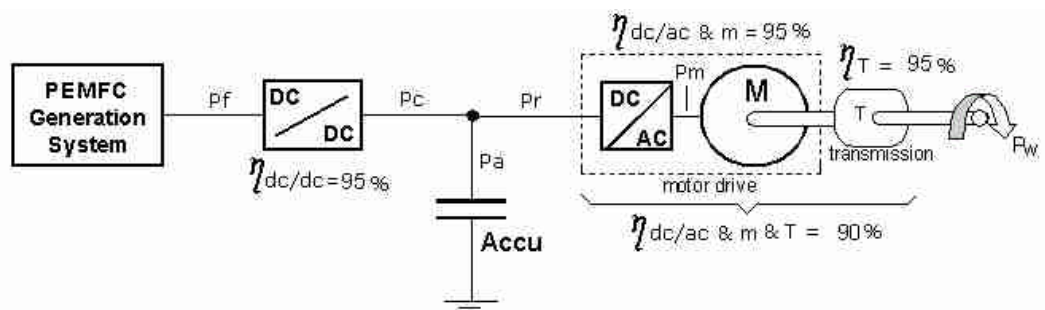
De linker grafiek geeft ons een wrijvingsweerstandcoëfficiënt van c.a. 0.040 en de rechter grafiek geeft ons een wrijvingsweerstandcoëfficiënt van ongeveer 0,012. Gemiddeld genomen zal een wrijvingsweerstandcoëfficiënt van 0,026 dus aangenomen kunnen worden.

In onderstaande figuur zijn testgegevens van de "SAM" scooter weergegeven, waarbij $v = f(t)$.



Figuur 52 Snelheid v.s. tijd van "SAM" testrit

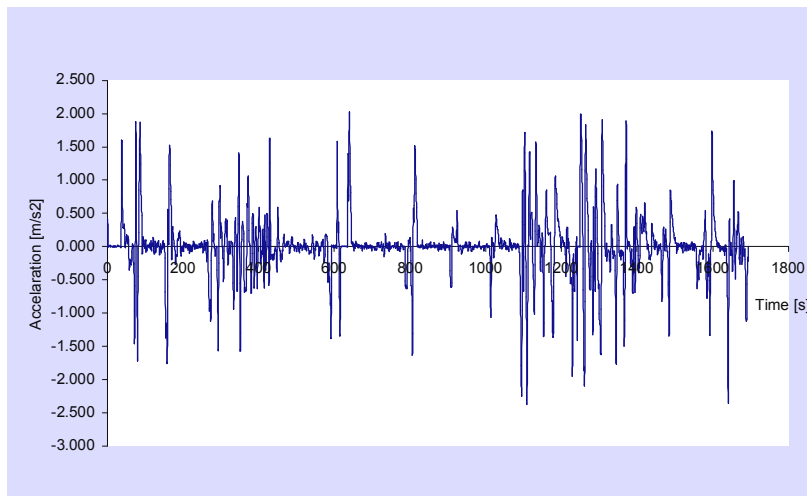
De gem. snelheid is, zoals zojuist gezegd, c.a. 60 [Km/h] (werkelijk c.a. 59,5 [Km/h]) $\approx 16,52$ [m/s] en de max. snelheid is 24,16 [m/s] ≈ 87 [Km/h]. Nu zullen we het totaal benodigde vermogen, in acht nemende de deelsysteemperformance, berekenen.



Figuur 53 Deelsysteem performances van "SAM"

Voorlopig is er voor de bepaling van de best benaderde C_d waarde geen beter alternatief dan gebruik te maken van gemiddelde meetwaarden. Deze zullen nu worden bepaald.

Bepaling van de gemiddelde acceleratie van "SAM":



Figuur 54 Acceleraties van de "SAM" gedurende de meting

De gemiddelde versnelling ($0,000286 \text{ [m/s}^2\text{]}$) geeft ons te kennen dat er gedurende het meten (1695 [s]) nagenoeg even veel acceleraties als deceleraties hebben plaatsgevonden die elkaar, qua intensiteit en hoeveelheid, vrijwel compenseren. We kunnen dus voor de berekening gewoon volstaan met een gemiddelde acceleratie van $0 \text{ [m/s}^2\text{]}$. Nu we de gemiddelde snelheid en de gemiddelde acceleratie bepaald hebben, moeten we nu alléén nog maar de gemiddelde vermogensvraag van de "SAM" zien te achterhalen, dit doen we wederom met behulp van de meetgegevens.

Het blijkt dat de gemiddelde vermogensvraag c.a. $4,940 \text{ [KW]}$ is. Nu is de er een redelijke schatting te maken van de C_d waarde van de "SAM".

$$P_{tot} = F_{tot} \cdot v = C_d \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot S + m \cdot a \cdot v + m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot v + P_0 \Rightarrow$$

$$P_{tot(h)} = P_{tot} / \{(h_{(dc/ac+m+T)} \cdot h_{dc/dc}) / 1 \cdot 10^4\} \Rightarrow$$

$$P_{tot(h)} = \frac{C_d \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot S + m \cdot a \cdot v + m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot v + P_0}{(h_{(dc/ac+m+T)} \cdot h_{dc/dc}) / 1 \cdot 10^4} [W] \Rightarrow$$

$$4,940 \cdot 10^3 = \frac{C_d \cdot 0,5 \cdot 1,2255 \cdot 16,52^3 \cdot 1,13 + 700 \cdot 0 \cdot 16,52 + 700 \cdot 9,80665 \cdot 0,026 \cdot 16,52 + 300}{(90 \cdot 95) / 1 \cdot 10^4}$$

$$SAM : C_d = 0,31239 \approx 0,31 [-]$$

Om enige indicatie te krijgen hoe aërodynamisch de "SAM" is, geven we hieronder even enkele voertuigen weer, in volgorde van aërodynamische weerstandswaarde.



Figuur 55 "Cd" waarden (luchtwrijvingsweerstandscoefficienten) van frontale oppervlakken van verschillende voertuigen

Aërodynamica is de "SAM" dus wat minder dan een "Volvo 740", en ietwat beter dan een touringcar. De rede waarom een touringcar gevoelsmatig een relatief lage luchtwrijvingsweerstandscoefficient heeft ten opzichte van bijvoorbeeld een truck met trailer is te verklaren doordat de grenslaag van de luchtstroming langer blijft 'aanleggen' aan de zijkant van de bus, en dus minder snel turbulent wordt en zo ook minder luchtwrijvingsweerstand heeft.

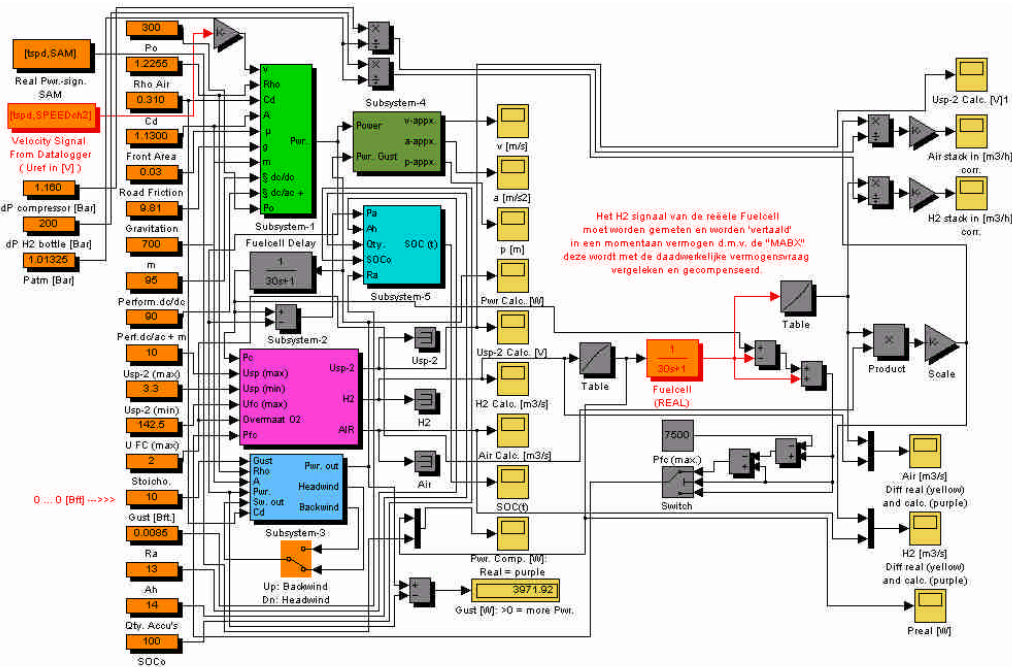
Hieronder worden de berekende waarden nog even geresumeerd:

P_0	=	300	[W]	Stationair vermogen “SAM” (board - systemen);
C_d	=	0,310	[-]	Luchtwrijvingsweerstandscoefficiënt;
μ	=	0,026	[-]	Wrijvingsweerstandscoefficiënt tussen wegdek en band;
$v_{gem.}$	=	16,520	[m/s]	Gemiddelde ‘cruise’ snelheid;
$a_{gem.}$	=	$226 \cdot 10^{-6}$	[m/s ²]	Gemiddelde versnelling van de “SAM”;
$P_{gem.}$	=	4940	[W]	Gemiddelde vermogensvraag van de “SAM”;
$A_{front.}$	=	1,130	[m ²]	Frontaal oppervlak benadering;
$m_{max.}$	=	700	[Kg]	Maximale totaal – gewicht (passagiers + brandstof etc.);
$\eta_{dc/dc}$	=	95	[%]	Veronderstelde systeemperformance dc/dc - converter;
$\eta_{dc/ac}$ én η_m	=	95	[%]	Veronderstelde systeemperform. dc/ac - conv. en motor;
$\eta_{trans.}$	=	95	[%]	Veronderstelde efficiency van de overbrenging.

Door statistische “Maximum Likelihood Estimations” kunnen bovenstaande getallen worden bevestigd als zijnde kloppend.

§ 8.2.2 Regelmodel van de vermogensbalansvergelijking

Al deze gegevens kunnen we, samen met de windkracht in Bft. (waarbij gekozen kan worden voor vóór of tegenwind) onderbrengen in een regelmodel wat er als volgt uit ziet:



Figuur 56 Regelmodel van vermogensbalansvergelijking van “SAM”

De verschillende subsystemen in bovenstaande figuur vertegenwoordigen de volgende functies:

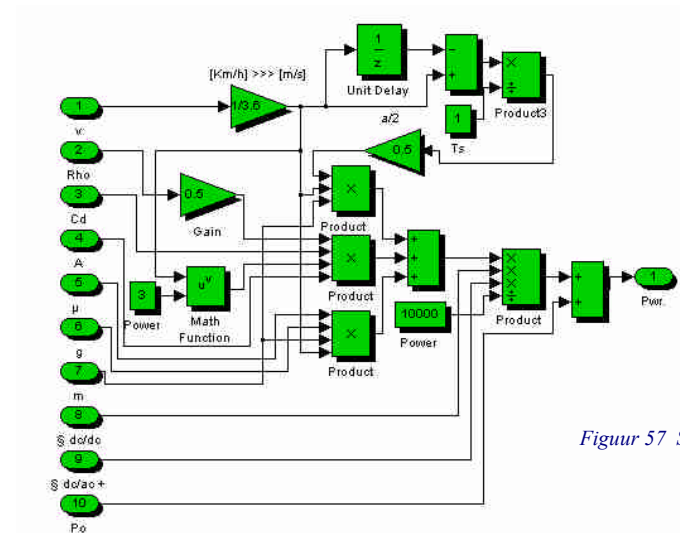
- Subsystem – 1: vermogensbalansvergelijking;
- Subsystem – 2: ‘scaling’ parameters voor regeling “DC / DC – converter” en F.C.;
- Subsystem – 3: wind beïnvloeding;
- Subsystem – 4: positie, snelheid en versnelling;
- Subsystem – 5: accu “state of charge” (SOC).

Deze deelsystemen zullen we in de nu volgende sub – paragrafen kort toelichten ...

§ 8.2.2.1 Subsystem – 1: De vermogensbalansvergelijking

De vermogensbalansvergelijking is als volgt:
$$P_{tot(h)} = \frac{C_d \cdot 0,5 \cdot r \cdot v^3 \cdot S + m \cdot a \cdot v + m \cdot g \cdot m \cdot v + P_0}{(h_{dc/ac+m+T}) \cdot h_{dc/dc}} \cdot 10^4 \quad [W]$$

Voeren we deze vergelijking in in een regelmodel, dan kunnen we ons dat als volgt voorstellen:

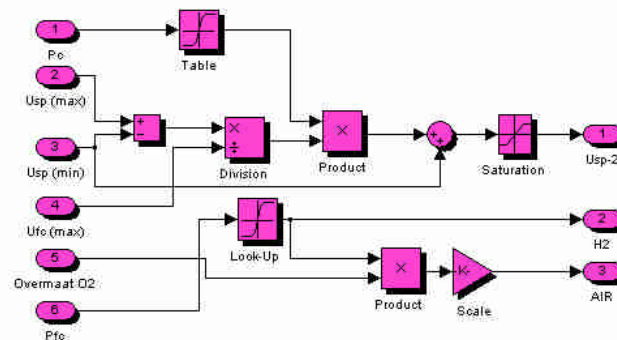


Figuur 57 Subsystem - 1

In bovenstaande model worden de systeemparemeters, zoals samengevat in § 8.2.1, toegepast om $P_{tot}(t)$ te berekenen.

§ 8.2.2.2 Subsystem – 2: De ‘scaling’ van parameters voor de converter en F.C.

Om de uitkomende regelsignalen (stuursignalen voor de H₂ regelklep en luchtklep [waarvan 21 % zuurstof] alsook U_{sp-2} voor de “DC / DC – converter”) in te stellen binnen een ‘range’ waarin ze toepasbaar zijn voor de converter en F.C., gebruiken we een subsystem ‘scaling’:



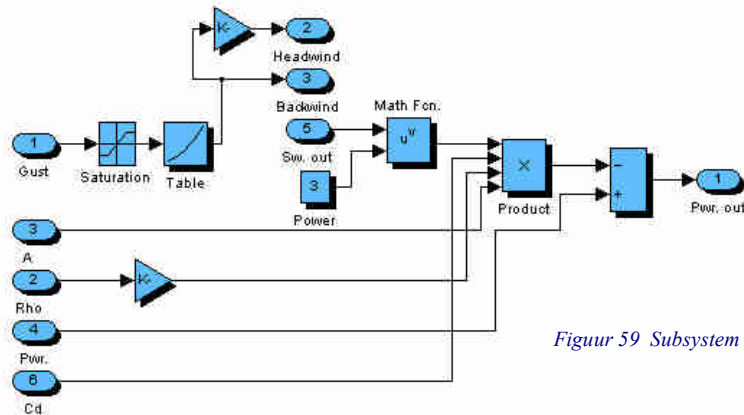
Figuur 58 Subsystem - 2

U_{sp-2} zal hierbij, met de traagheid van de F.C. worden aangeboden aan de “DC / DC – converter”, om hiermee te voorkomen dat er vermogen uit de F.C. zal worden getrokken als deze nog niet beschikbaar is aan de uitgang van de F.C..

§ 8.2.2.3 Subsystem – 3: Wind beïnvloeding

Optioneel kan er nog gekozen worden voor een invoering van wind beïnvloeding. Op het moment dat we bijvoorbeeld te maken hebben met een cruise snelheid van bijvoorbeeld 14 m/s van de “SAM”, en we hebben een tegenwind van 5 m/s, dan ontstaat er een situatie die vergelijkbaar is met een windstille situatie waarbij de “SAM” 19 m/s rijdt, en is er uiteraard meer vermogensvraag van de F.C.. Op het moment dat we te maken hebben met eenzelfde windsnelheid vóór de wind, dan kenmerkt deze situatie zich als zijnde het geval dat de “SAM” 9 m/s rijdt, en is er, vanzelfsprekend, minder vermogen vereist

van de F.C.. Hieronder wordt de wind beïnvloeding in een blokschematische vorm in het regelmodel geïmplementeerd:

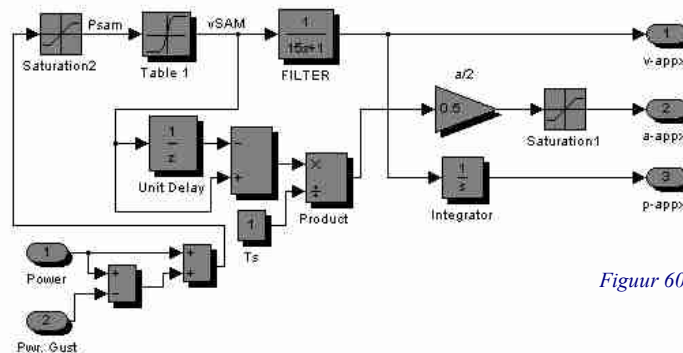


Figuur 59 Subsystem - 3

Uit dit bovenstaande model komt ook duidelijk naar voren dat voor een verdubbeling van de snelheid Power^3 ($= 2^3 \times = 6x$) meer vermogen nodig is.

§ 8.2.2.4 Subsystem – 4: Positie, Snelheid en Versnelling

Uit het berekende (totaal-) vermogen is een positie, een snelheid en een versnelling te halen door de wetenschap dat: $a = dv/dt$ en $v = dp/dt$ ofwel: $v = a$ geïntegreerd naar de tijd en $p = v$ geïntegreerd naar de tijd:



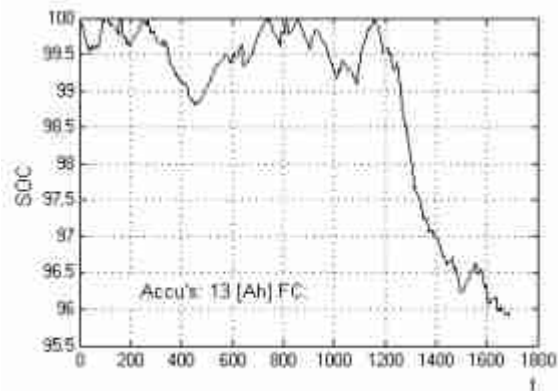
Figuur 60 Subsystem - 4

Omdat het werkelijke vermogenspatroon behoorlijk piekerig is verdient het zeker aanbeveling een laagdoorlaatfilter toe te passen, (met een τ waarde overeenkomstig de systeem tijdsconstante) om zo een reëler beeld te krijgen van de snelheid en de positie in de tijd, welke hier indirect uit ontstaan. Ook blijkt de acceleratie, na deling door twee, binnen de werkelijke 'range' gebracht te zijn van maximaal c.a. 3 m/s^2 , hetgeen te verklaren kan zijn door verstoringen in de meting waarop later terug zal worden gekomen.

§ 8.2.2.5 Subsystem – 5: Accu state of charge

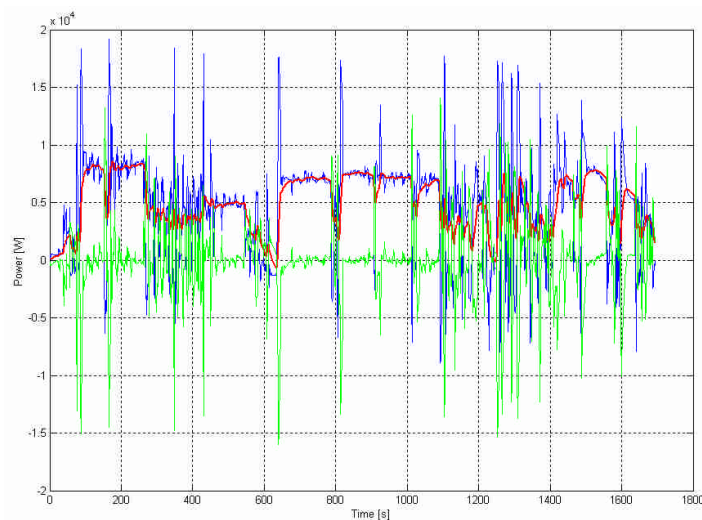
Als laatste subsystem kunnen we de SOC of ladingstoestand van de accu's berekenen. Dit zal in geheel analoog verlopen zoals dat alreeds in § 8.1.1 besproken is.

Uiteraard zijn de resultaten van dit regelmodel uniform aan die van figuur 30 bij 14 accu's van 13 Ah, maar zoals ook daar is vermeld zijn de vorig jaar aangeschafte accu's daarbij letterlijk en figuurlijk wel een 'zwaar' alternatief om 168 V nominaal te bereiken.



Figuur 61 SOC bij 13 Ah accu's

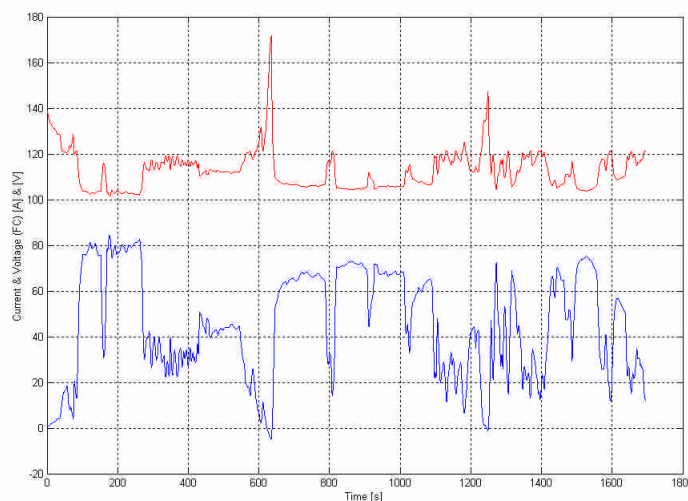
Simuleren we dit alles in "Simulink" dan kunnen we het volgende systeemgedrag waarnemen:



Figuur 62

Vermogens simulatie

De bovenstaande blauwe curve visualiseert het gedrag van de werkelijke gemeten) vermogensvraag en de rode curve visualiseert het gedrag van de brandstofcel bij een systeem - tijdsconstante van 15 [s]. Het verschil tussen beiden (groene curve) 'vertaalt' zicht in het dynamische 'gedrag' van de accu. Zoals gezegd kan men stellen dat de dynamica van de F.C. 'in' de accu gaat zitten. De stroom en de spanning van de brandstofcelcurve (rode lijn in voorgaande figuur) is weergegeven in onderstaande figuur.

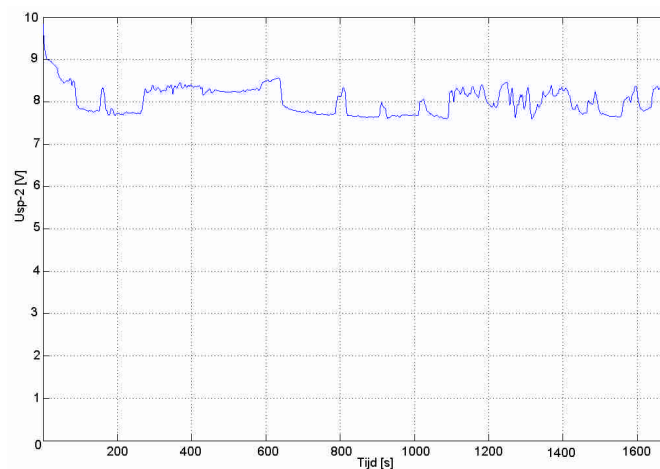


Figuur 63

U_{fc} en I_{fc}

De bovenste curve geeft de F.C. – spanning, en de onderste curve geeft de F.C. – stroom.

Uiteraard is de vermogensvraag van de F.C. direct te 'vertalen' in een spanningssetpoint welke navenant tussen 3,3 resp. 10 [V] zal fluctueren. Na conversie van de setpointstroom van de "DC / DC – converter" in een setpointspanning geeft dit het volgende verloop:



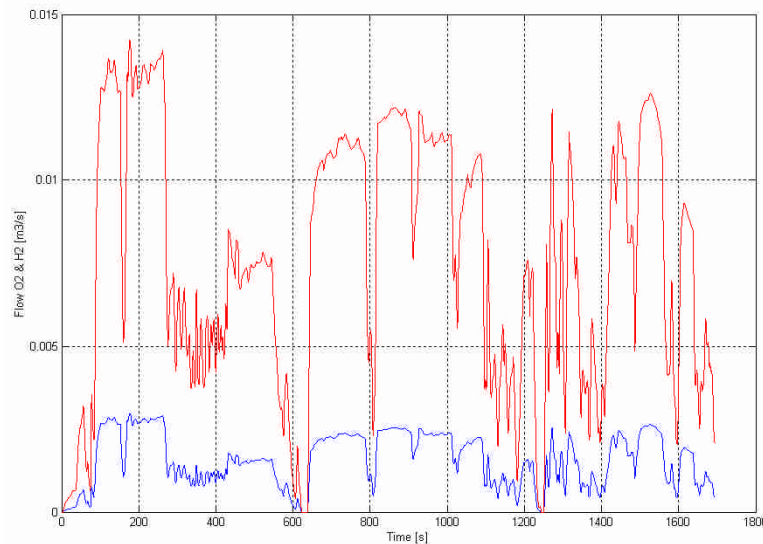
Figuur 64

Spanningsetpoint converter

Bovenstaande grafiek geeft ons een verloop van U_{sp-2} ('vertaald' uit I_{sp-2}) van de "DC / DC – converter". Hiervan is te zien dat de spanning rond de 8 volt fluctueert. Als we de "DC / DC – converter" dus niet regelen, maar op een constant spanningssetpoint instellen van 8 volt is hiermee de regeling in principe gerealiseerd. Voor de F.C. is hiervoor een constante 'vermogensvraag' ingesteld ($8 / 10 \times 142,5 \text{ V} \times 43 \text{ A}$ c.a. 5 KW overeenkomstig de gemiddelde vermogensvraag).

Het verband tussen de stroom resp. spanningsvraag van de 'stack' verhoudt zich in een bepaalde mate tot de flow H_2 alsook O_2 en de flow van O_2 is weer om te zetten in een air – flow door de flow van O_2 te delen door 0,21 wetende dat er c.a. 21 [%] zuurstof zit in de lucht.

Bovenstaande spanning – setpoint gedrag resulteert dus in een H_2 resp. O_2 flow zoals hieronder is weergegeven:



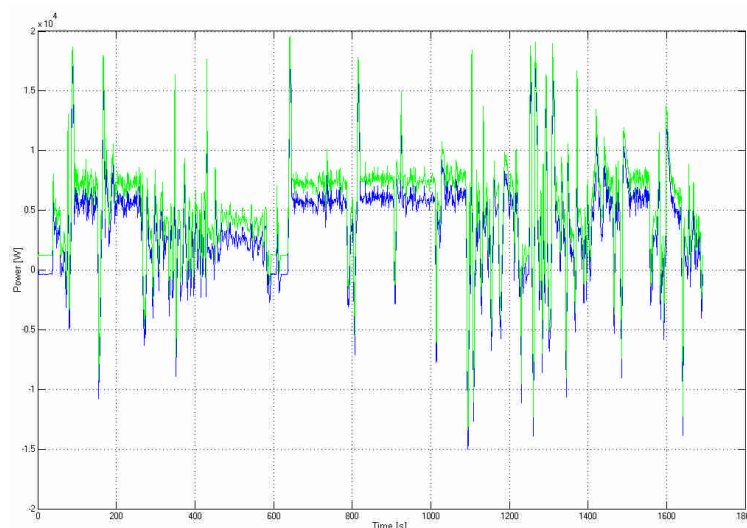
Figuur 65

Flow H_2 en O_2 door de 'stack'

De blauwe curve is representatief voor de flow H_2 en de rode curve vertegenwoordigt de flow lucht. Met deze massastroom van H_2 en lucht zijn de standen van de flow kleppen te bepalen.

De brandstofcelcurve die hiervoor is toegepast is in figuur 11 al weergegeven.

Met de schakelaar onder "Subsystem – 3" in figuur 56 ("Manual Switch") is het mogelijk om te kiezen voor een situatie met vóór de wind of tegenwind. Als voorbeeld kunnen we ons een situatie voorstellen van 7 Bft. (7 "Beaufort", ofwel een windsnelheid van $\approx 15,5 \text{ m/s}$), bij 'backwind' (blauwe figuur = voor de wind = minder vermogen nodig) en 'headwind' (groene figuur = tegen wind = méér vermogen):



Figuur 66

Backwind and Headwind

Het verschil tussen 7 Bft. vóór of tegenwind is dus ruim 1,5 KW.

§ 8.2.3 Extra alternatief voor vermogensbalansvergelijking regelmodel

De vermogensbalansvergelijking zoals we deze in voorgaande paragraaf (§ 8.2.2) uitvoerig hebben toegelicht k n, voor wat betreft het model z nder windbeïnvloeding, SOC en scaling ook als volgt worden ontwikkeld:

$$v = \frac{dx}{dt} = \dot{x} \Rightarrow dt = \frac{dx}{v}$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{dx}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2} = \ddot{x} \Rightarrow dt = \frac{dv}{a}$$

$$dt = \frac{dx}{v} = \frac{dv}{a} \Rightarrow a \cdot dx = v \cdot dv$$

$$F = C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot r \cdot v^2 \cdot S + m \cdot m \cdot g + m \cdot a$$

$$P_{tot} = (P_0 + F \cdot v) \cdot h_{drive}$$

$$P_{fc} = (P_{tot} - P_a) \cdot h_{dc} \Rightarrow$$

$$P_{fc} = [(P_0 + F \cdot v) \cdot h_{drive} - P_a] \cdot h_{dc} \Rightarrow$$

$$P_{fc} = (P_0 + F \cdot v) \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} - P_a \cdot h_{dc} \Rightarrow$$

$$P_{fc} = [P_0 + (C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot r \cdot v^2 \cdot S + m \cdot m \cdot g + m \cdot a) \cdot v] \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} - P_a \cdot h_{dc} \Rightarrow$$

$$P_{fc} = P_0 \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} + (C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot r \cdot v^2 \cdot S + m \cdot m \cdot g + m \cdot a) \cdot v \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} - P_a \cdot h_{dc} \Rightarrow$$

$$P_{fc} = P_0 \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} + C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot r \cdot v^2 \cdot S \cdot v \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} + m \cdot m \cdot g \cdot v \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} + m \cdot a \cdot v \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} - P_a \cdot h_{dc} \Rightarrow$$

$$P_{fc} = P_0 \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} + C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot r \cdot \dot{x}^3 \cdot S \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} + m \cdot m \cdot g \cdot \dot{x} \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} + m \cdot \ddot{x} \cdot \dot{x} \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} - P_a \cdot h_{dc} \Rightarrow$$

$$P_{fc} = (P_0 + C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot r \cdot \dot{x}^3 \cdot S + m \cdot m \cdot g \cdot \dot{x} + m \cdot \ddot{x} \cdot \dot{x} - \frac{P_a}{h_{drive}}) \cdot h_{dc} \cdot h_{drive}$$

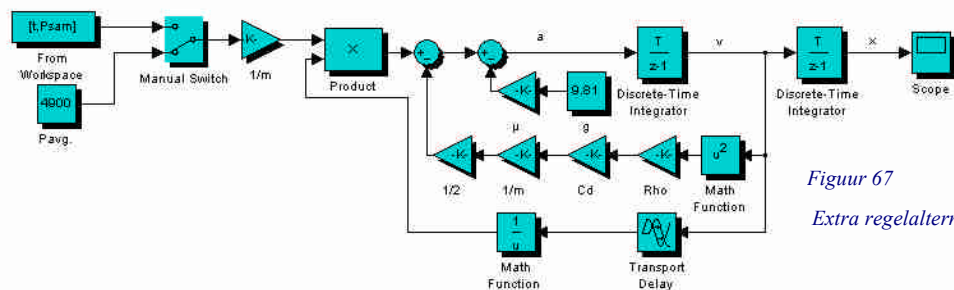
$$m \cdot \ddot{x} \cdot \dot{x} \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} = P_{fc} - P_0 \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} - C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot r \cdot \dot{x}^3 \cdot S \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} - m \cdot m \cdot g \cdot \dot{x} \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} + P_a \cdot h_{dc} \Rightarrow$$

$$\ddot{x} = \frac{P_{fc} - P_0 \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} - C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot r \cdot \dot{x}^3 \cdot S \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} - m \cdot m \cdot g \cdot \dot{x} \cdot h_{drive} \cdot h_{dc} + P_a \cdot h_{dc}}{m \cdot \dot{x} \cdot h_{drive} \cdot h_{dc}} \Rightarrow$$

$$\ddot{x} = \frac{P_{fc}}{m \cdot \dot{x} \cdot h_{drive} \cdot h_{dc}} - \frac{P_0 \cdot h_{drive} \cdot h_{dc}}{m \cdot \dot{x} \cdot h_{drive} \cdot h_{dc}} - \frac{C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot r \cdot \dot{x}^3 \cdot S \cdot h_{drive} \cdot h_{dc}}{m \cdot \dot{x} \cdot h_{drive} \cdot h_{dc}} - \frac{m \cdot m \cdot g \cdot \dot{x} \cdot h_{drive} \cdot h_{dc}}{m \cdot \dot{x} \cdot h_{drive} \cdot h_{dc}} + \frac{P_a \cdot h_{dc}}{m \cdot \dot{x} \cdot h_{drive} \cdot h_{dc}} \Rightarrow$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{m \cdot \dot{x}} \cdot \left(\frac{P_{fc}}{h_{drive} \cdot h_{dc}} - P_0 - \frac{C_d \cdot r \cdot \dot{x}^3 \cdot S}{2} - m \cdot g \cdot \dot{x} + \frac{P_a}{h_{drive}} \right)$$

Hiermee kunnen we het volgende regelmodel opbouwen, wat qua werking verder hetzelfde is:



Figuur 67
Extra regelalternatief P- balans

Hierbij is er begonnen bij de hoogste afgeleide van "x" voor de opbouw van het model.

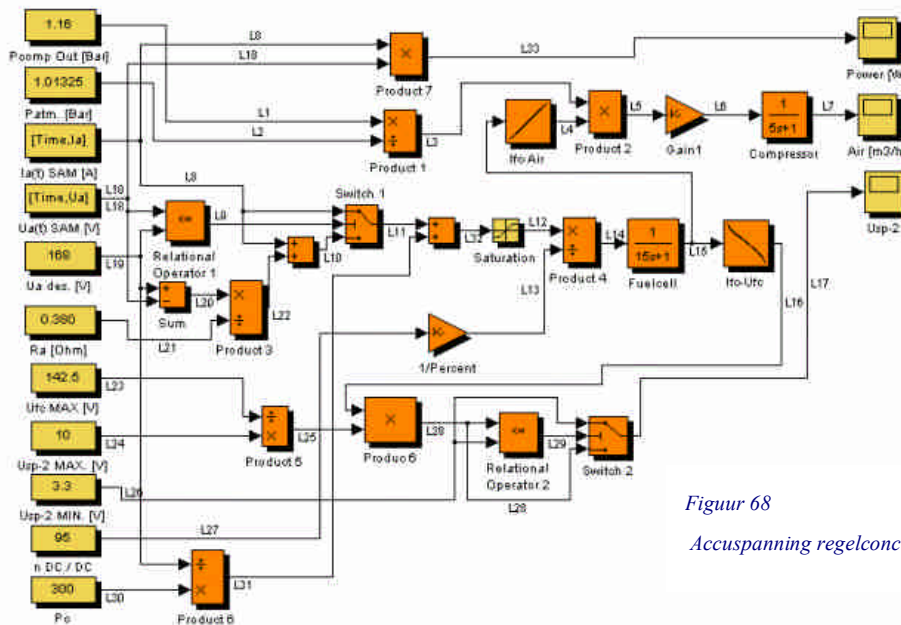
Het vorige model was, ten opzichte van bovenstaande, ietwat meer 'wiskundig' van opbouw, iets wat uit een meer persoonlijk voorkeur is ontstaan.

§ 8.2.4 Ondervonden problemen bij dit regelmodel

Enige minpunt aan de vorm van regelen zoals besproken in § 8.2 is dat, ook bij het loslaten van het gaspedaal van de “SAM” er nog steeds een vermogen van de brandstofcel wordt ‘verlangd’, terwijl men ‘gewoon’ aan het uitrollen is. Natuurlijk kan dit vermogen voor een groot deel opgesoupeerd worden door het accupakket, en zal het activeren van het gaspedaal dus tevens als extra ‘voorwaarde’ moeten gelden voor het ‘vragen’ van vermogen uit de ‘stack’.

§ 8.3 Derde regelconcept, d.m.v. accuspanning (voorkeur)

Gezien de eenvoud en betrouwbaarheid van dit concept verdient dit regelconcept wellicht de meeste voorkeur. Deze betrouwbaarheid kan worden verklaard door het feit dat uitsluitend accuspanning en stroom als regelparameters gaan gelden. Dit regelmodel kan als volgt voorgesteld worden:



Figuur 68
Accuspanning regelconcept

N.B.: De verbindinglijnen tussen de verschillende blokken zijn genummerd met L1 ... L33 om in een later stadium “dSpace” (het programma waarmee de, weldra besproken, “MABX” aangestuurd zal worden) te laten weten welke componenten met elkaar verbonden zijn via welke lijnen.

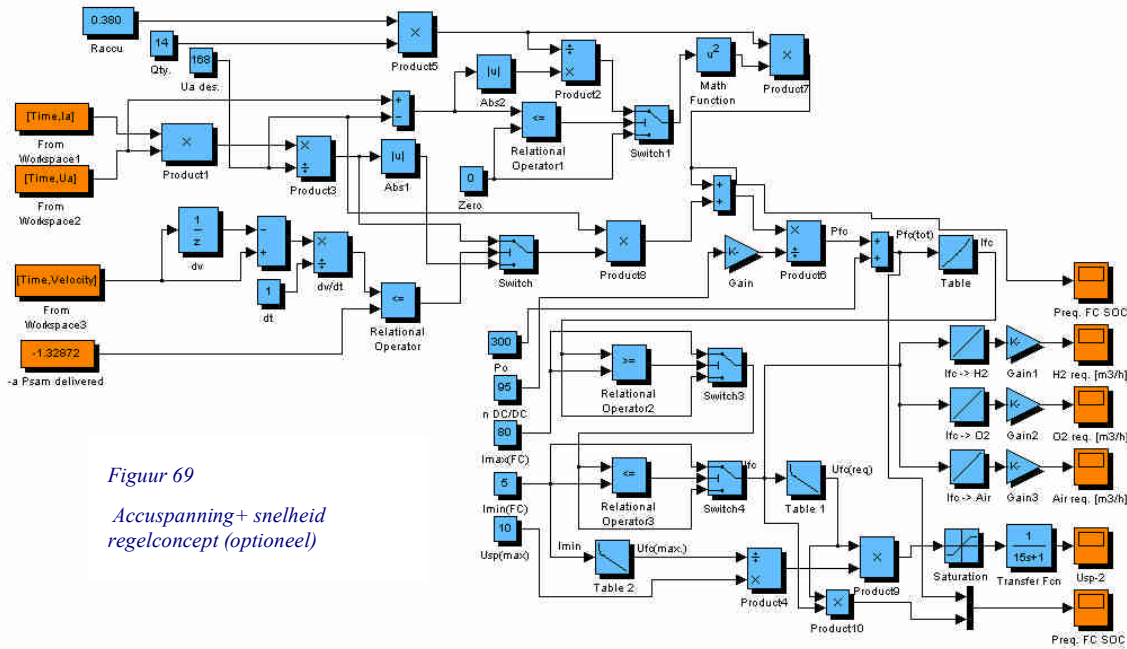
Het idee achter dit regelmodel is: de brandstofcel direct aan te sturen met de stroom die op het betreffende tijdstip uit de accu’s wordt getrokken, met daarbij opgeteld de dU (spanningsval minder dan 168 V nominaal) gedeeld door R_a (interne weerstand van de accu) om tevens de SOC op peil te houden. Tevens worden bij dit regelmodel - zoals te zien in de figuur - bepaalde parameters begrensd, zoals U_{sp-2} van de “DC / DC – converter” en wordt de “Air” flow aangepast aan de druk van de compressor die een factor $1,16500 / 1,01325$ hoger ligt dan in voorgaande regelmodellen het geval was. (15% lager vereiste flow, immers: $\text{massastroom} = \rho \cdot v \cdot A = \text{constant}$). Ook wordt U_{sp-2} ‘afgebakend’ binnen de limieten die ook bij de converter van “P.R.E.” (“Power Research Electronics”) worden gehanteerd, te weten: 3,3 ... 10 volt. Ook wordt het rendement en het (originele-) stationaire vermogen van de “SAM” in dit verband betrokken om het ‘plaatje’ compleet te maken. De verlangde (desired) accuspanning behoort 168 V (14 x 12 volt) te zijn voor de tractie ‘drive’ van de “SAM”.

In de nu volgende paragraaf wordt nog een extra regelparameter toegepast voor de regeling van het systeem, namelijk: de snelheid van de “SAM”. Omdat een extra regelparameter het systeem onbetrouwbarder maakt, is de hiervoor besproken regelstrategie wellicht beter.

Na § 8.3.1 rest ons nog een omschrijving van de rede waarom er constante waarde van 380 mΩ per accu wordt toegepast voor het totale accupakket, dit zal in § 8.3.2 besproken.

§ 8.3.1 Derde regelconcept, d.m.v. accuspanning én snelheid (optioneel)

Indien we bij het regelmodel, zoals hierboven in figuur 68, ook de snelheid van de “SAM” als regelparameter gebruiken, of liever gezegd: als extra regelvoorwaarde hanteren, dan verkrijgen het volgende model:



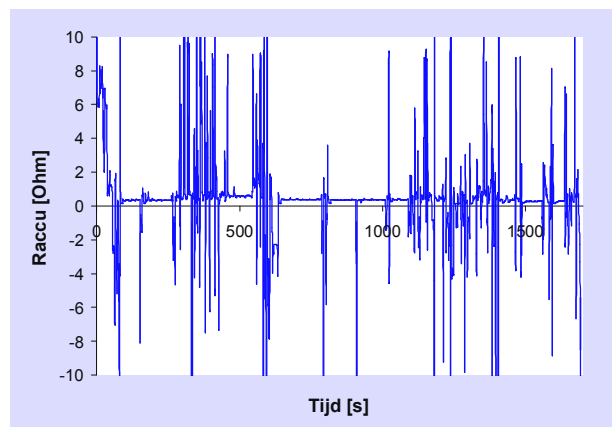
Figuur 69

Accuspanning+ snelheid
regelconcept (optioneel)

Dit regelconcept is qua opzet vergelijkbaar met voorgaande, alleen nu is het de snelheid die bepaald of het accupakket – zelfs bij stilstand – zal worden bijgeladen of niet. Op het moment dat de accuspanning kleiner is dan de gewenste 168 volt, ontstaat er een dU welke, na deling van de totale accuweerstand, een bepaalde (absolute) stroomvraag van de F.C. verlangt. Na onderzoek van de meetdata (zoals in hoofdstuk 11 wordt besproken) is gebleken dat de “SAM” pas écht regeneratief gaat werken als de remversnelling kleiner wordt dan $-1,32872 \text{ m/s}^2$. Als we de snelheid nu meten, en we weten dat $a = dv/dt$, dan is zo eenvoudig de versnelling van de “SAM” te bepalen en zal deze van de vermogensvraag van de F.C. worden afgehaald als $a < -1,32872 \text{ m/s}^2$. Verder is ook in dit schema te zien dat verschillende systeemparameters ‘afgebakend’ zijn, dat het rendement in de berekening wordt meegenomen, en dat U_{sp-2} , met de traagheid van de ‘stack’ aan de “DC / DC – converter” wordt aangeboden als een spanning ‘setpoint’ voor de cel.

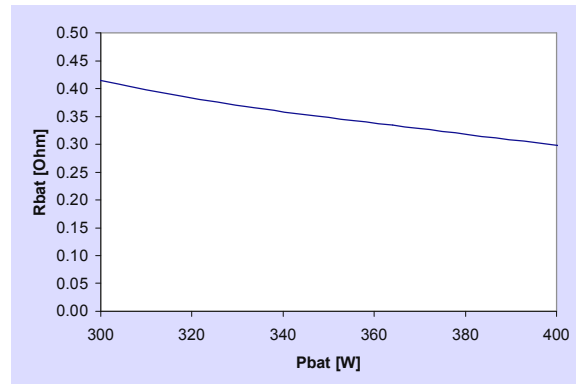
§ 8.3.2 Constante benadering van de accuweerstand

Als we het gevraagde vermogen weten, en we ‘vertalen’ dit in een gevraagde accu-stroom op dat tijdstip, dan kunnen we – er vanuit gaande dat deze stroom volledig uit de accu’s wordt getrokken – de lading van de accu op ieder tijdstip (t) bepalen. Echter, temperatuur, omgevingsdruk, ouderdom e.d. spelen ook een belangrijke rol bij de bepaling van de SOC van de accu, en dat maakt het geheel zéér complex. Het mag duidelijk zijn de regelstrategie van figuur 68 hiermee de grootste voorkeur heeft, omdat de SOC van de accu dan minder nauwlettend in de gaten gehouden behoeft te worden, temeer als we bedenken dat de momentane accuspanning tevens een redelijke richtlijn is voor de momentane SOC. We kunnen dan uitgaan van een interne accuweerstand van c.a. $380 \text{ m}\Omega$, zoals direct blijkt uit het *niet piekerige* traject van de onderstaande grafiek welke de accuweerstand van één van de accu’s van het totale accupakket vertegenwoordigt:



Figuur 70 Ra v.s. Tijd

Het 'piekerige' gedrag is te verklaren door de vele vermogensfluctuaties en hoge dP/dt op bepaalde tijdstippen. Volgens "Hawker", de fabrikant die de toegepaste "Genesis" accu's fabriceert, geldt er vanuit hun eigen meetgegevens het volgende verband tussen accuweerstand en accuvermogen:



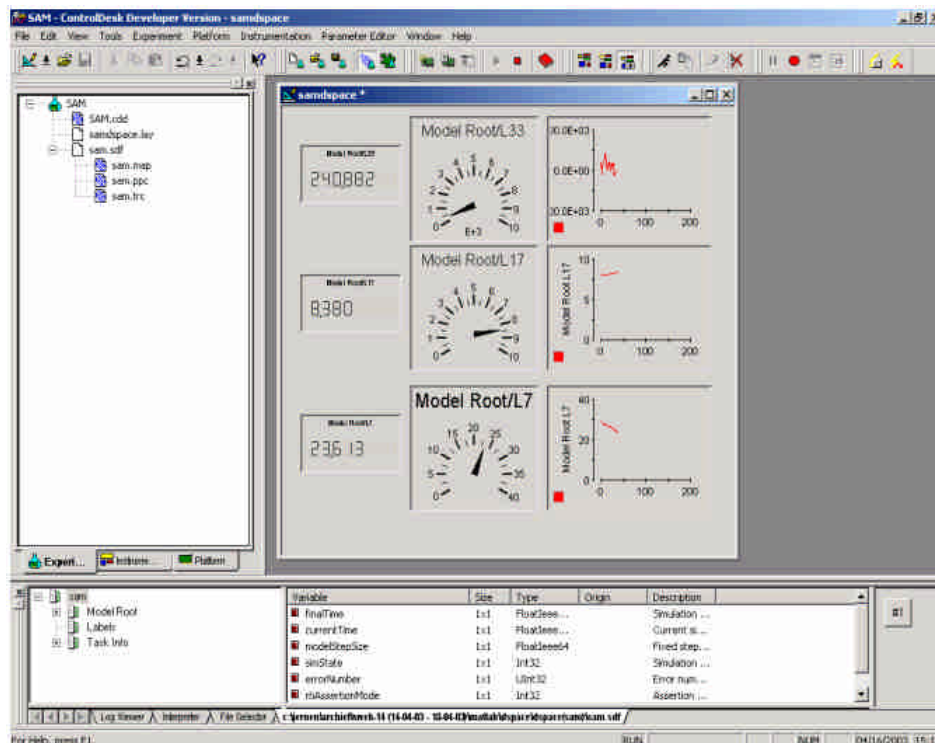
Figuur 71

 R_a v.s. U_a

Het gemiddelde vermogen is c.a. 5 KW en dit geeft bij 14 accu's een vermogen van c.a. 360 W per accu, hetgeen bevestigt dat een interne weerstand van c.a. 360 m Ω niet een slechte praktische benadering is.

§ 8.3.3 Toepassing "dSpace" voor de regeling bij accuspanning

Op het moment dat we in "Simulink" van "Matlab" een compileeropdracht geven ("Ctrl." + "B"), dan zetten we het model om in een "Borland – C++" – taal welke begrepen wordt door "Control Desk" van "dSpace". "dSpace" is een ontwikkelomgeving waarvan veelvuldig door technici gebruik wordt gemaakt om processen te 'controleren' op de 'desktop' van de P.C., vandaar ook de toepasselijke naam. Na het geven van een converteeropdracht in "Simulink" van "Matlab" kunnen we dit vervolgens in "Control Desk" van "dSpace" als zijnde "New Project" aanmaken. Als we in dit "Nieuwe Project" "gauges", "plotters" en "displays" plaatsen kunnen we "vermogen", " U_{sp-2} " en "air" van regelmodel in figuur 68 'runnen', waarbij in dit geval achtereenvolgens "L33", "L17" en "L7" voornoemde systeemparameters in zelfde volgorde 'scopen', zoals figuur 72 hieronder weergeeft:



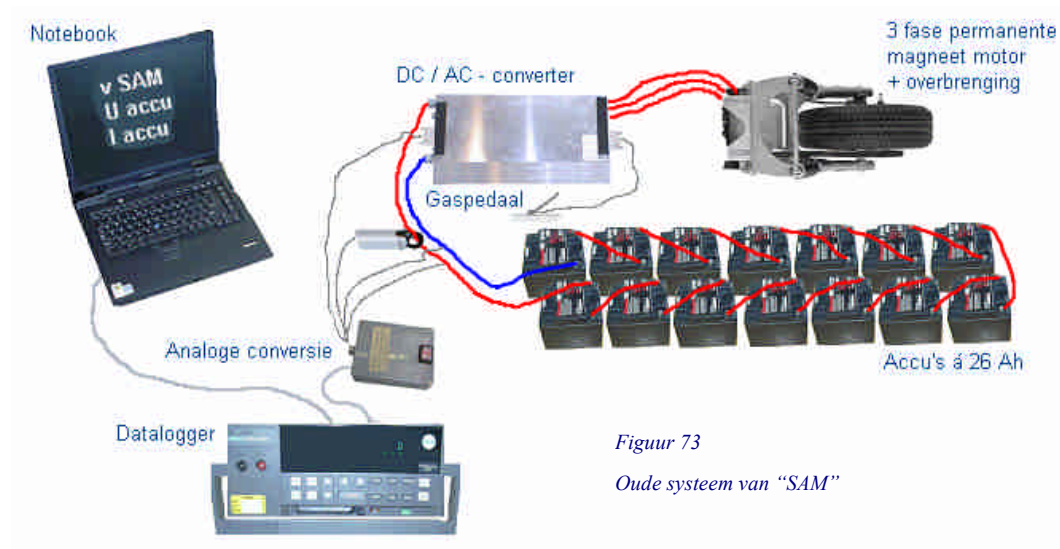
Figuur 72 Control Desk voorbeeld

Figuur 62 (rode grafiek); 64 en 65 (rode grafiek) geven na c.a 50 seconde achtereenvolgens “P_{sam}” ([W]); “U_{sp-2}” ([V]) en “Air” ([m³/h]) als zijnde c.a. 241 [W]; c.a. 8,3 [V] en 24 [m³/h] aan als regelwaarden (regelparameters), wat ook door bovenstaande “Control Desk” voorbeeld wordt bevestigd. Van dit “dSpace” programma zullen we ook, na meting met de “Fluke - datalogger” in de “SAM”, gebruik gaan maken om zodoende meer vertrouwd te raken met de “MABX”.

In het nu volgende hoofdstuk zullen we de meting met de “Fluke - datalogger” gaan beschrijven, om in het daarop volgende hoofdstuk dezelfde meting met de “MABX” te doen. Hierna zal er nog een hoofdstuk volgen waarin de meetdata zal worden besproken (statistisch) en onderzocht. Hieruit zullen straks de slotbeweringen, conclusies en aanbevelingen volgen.

Hoofdstuk – 9 “SAM” met de “Fluke - datalogger”

Het systeem van de “SAM”, zoals dat door de fabrikant van “SAM” wordt gemaakt in combinatie met meetapparatuur van E.C.N., is hieronder weergegeven:



Figuur 73

Oude systeem van “SAM”

Het originele systeem bestaat uit de volgende deelsystemen:

- 14 accu's á 26 Ah bij 12 V;
- “DC / AC – bidirectionele tractie converter”;
- 3 fase permanente magneet motor;
- Tandriem overbrenging;
- Bekabeling om deelsystemen met elkaar door te verbinden.

Voor wat betreft de meting van verschillende systeemparementers wordt meetapparatuur van E.C.N. toegepast; het gaat hierbij om een:

- Een LEM ‘amperetang’;
- Een analoog conversiekastje (voor analoge ‘scaling’ binnen de ‘range’ van de datalogger);
- Een “Fluke – datalogger”;
- Een laptop (optioneel) om de data van de datalogger in “Excel” te kunnen laden d.m.v. gebruik te maken van het programma “Scan Scape 32” van “Fluke”;
- Bekabeling om de verschillende datasignalen aan te bieden aan het analoge conversiekastje.

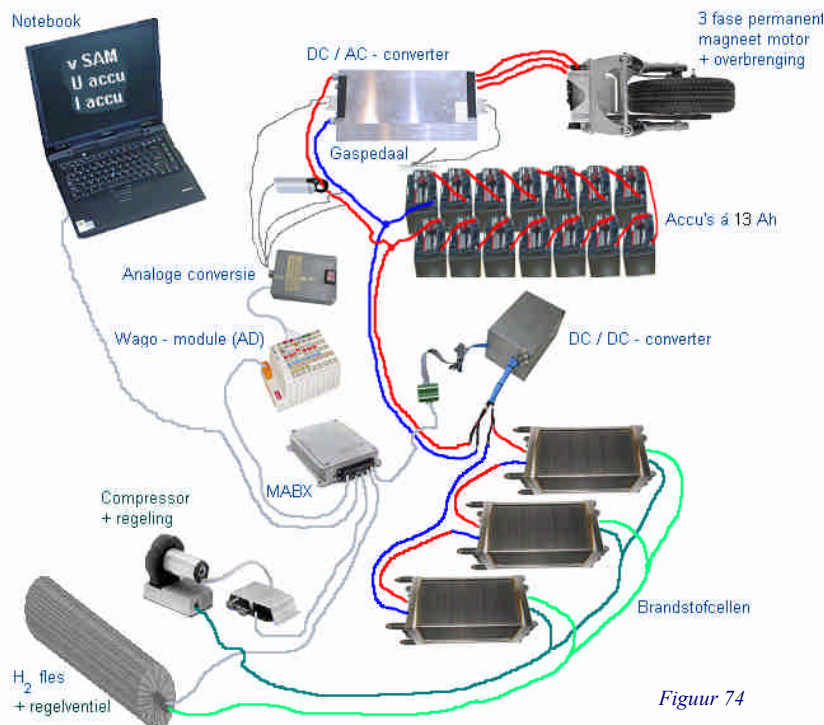
Het analoge conversiekastje zal, zoals reeds aangegeven, de gemeten systeemparementers binnen de ‘range’ (meetbereik) van de “Fluke – datalogger” brengen, om ze vervolgens hiermee te kunne meten en op de ‘data – card’ van de datalogger op te slaan . Het gaat hierbij om de volgende meetsignalen:

- Accuspanning;
- Accustroom;
- Snelheid van de “SAM”;
- Temperaturen in het glycol koelcircuit van de “DC / AC – bidirectionele tractieconverter”; 3 fase permanente magneetmotor en ‘spine’ (rijwindgekoelde ‘radiateur’ van de “SAM”) om de koelcapaciteit te bepalen (dit zijn de z.g.n. ‘optionele sensoren’ buiten het analoge conversiekastje om).

N.B.: Omwille van de overzichtelijkheid is in bovenstaande figuur (figuur 73) niet het glycol koelcircuit weergegeven. Op dit koelcircuit komen we later nog terug.

Hoofdstuk – 10 “SAM” met de “F.C.” & “MABX”

Het nieuwe systeem van de “SAM”, zoals dat door E.C.N. ontwikkeld zal worden in combinatie met meetapparatuur van E.C.N., is hieronder weergegeven:



Figuur 74

Nieuwe systeem van “SAM”

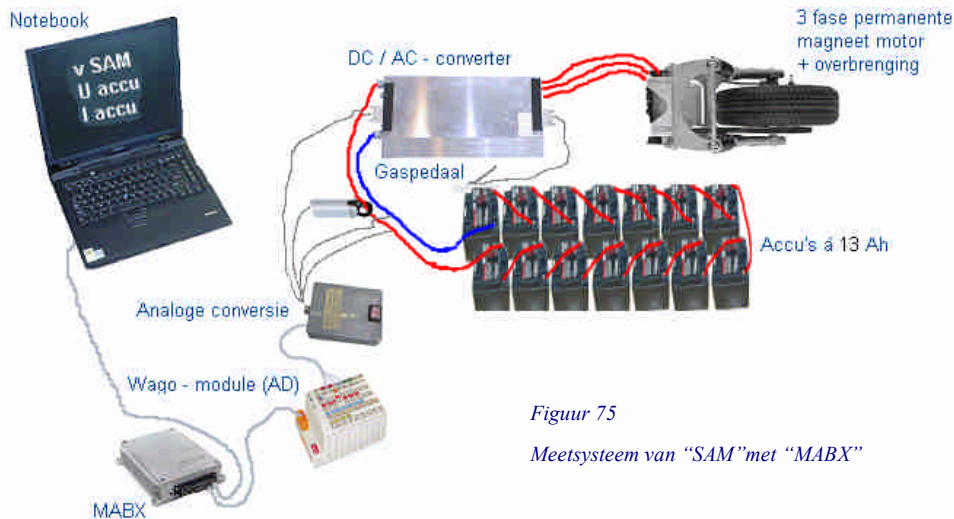
Het originele systeem bestaat uit de volgende deelsystemen:

- 14 accu's á 13 Ah bij 12 V;
- “DC / AC – bidirectionele tractie converter”;
- “DC / DC – converter” om spanningsniveau van de F.C. ‘op te tillen’ tot U_{accu} ;
- 3 fase permanente magneet motor;
- Tandriem overbrenging;
- 3 brandstofcellen á 50 cellen bij c.a 30 V bij c.a. 2,7 KW;
- Compressor met $P = 1165$ mBar;
- H_2 fles voor c.a. 0,732 Kg waterstof, d.w.z.: tank van ruim 8 ltr. ($2 \cdot 10^5$ mBar);
- LEM ampèretang;
- Appendages (kleppen en regelventielen voor regeling v/d flow v/d H_2 fles en compressor);
- CAN controller – systeem;
- CAN sensoren; actuatoren en converters;
- Thermokoppels (meestal K – type);
- Analooog conversiekastje (voor analoge ‘scaling’ binnen de ‘range’ v/d “Wago” module);
- “Wago” module (voor A/D – conversie van de signalen binnen de ‘range’ v/d “MABX”);
- MABX;
- Een laptop (optioneel) om de data van de “MABX” in “Control Desk” te kunne laden;
- Bekabeling om de verschillende datasignalen aan te bieden aan het analoge conversiekastje;
- Bekabeling om deelsystemen met elkaar door te verbinden.

De werking van het, ook tijdens de stage ontworpen analoge conversie kastje, zal in het nu volgende hoofdstuk kort worden toegelicht, maar éérst zal in de nu volgende paragraaf nog even kort worden ingegaan op de test met de “MABX” in de “SAM” functionerend als ‘datalogger’.

§ 10.1 De “MABX” toegepast als ‘datalogger’

Alvorens “SAM” met zowel “F.C.” en “MABX” uit te rusten, zoals zojuist kort is toegelicht, is tijdens de stage éérst een meting met de “Fluke – datalogger” gedaan om te kijken of het goed mogelijk was verschillende systeemp parameters in kaart te brengen. Later is eenzelfde meting gedaan met de “MABX” van “dSpace” om zodoende te checken of het in de nabije toekomst goed mogelijk zou zijn deze ‘computer – interface en controller’ van “dSpace” toe te passen. Hiervoor is de opstelling zoals in figuur 74 was weergegeven aangepast tot onderstaande meetopstelling:



Figuur 75

Meetsysteem van “SAM” met “MABX”

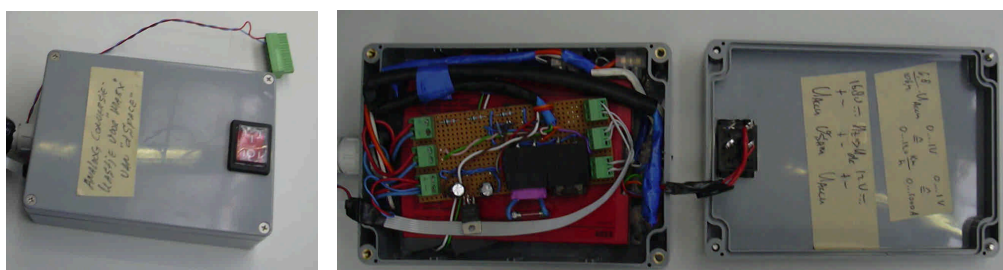
Om met deze meetopstelling te kunnen meten zijn er, naast een LEM ampèretang en het originele systeem van “SAM” met in de “DC / AC – converter” een aansluiting waarmee het snelheids – pulssignaal wordt ‘afgetakt’, de volgende meetcomponenten te onderscheiden:

- Analoge conversiekastje (voor analoge ‘scaling’ binnen de ‘range’ v/d “Wago” module);
- “Wago” module (voor A/D – conversie van de signalen binnen de ‘range’ v/d “MABX”);
- “MABX” real time computer van “dSpace”;
- Een laptop (optioneel) om de data van de “MABX” in “Control Desk” te kunne laden.

Deze vier punten zullen in de drie volgende sub paragrafen worden besproken.

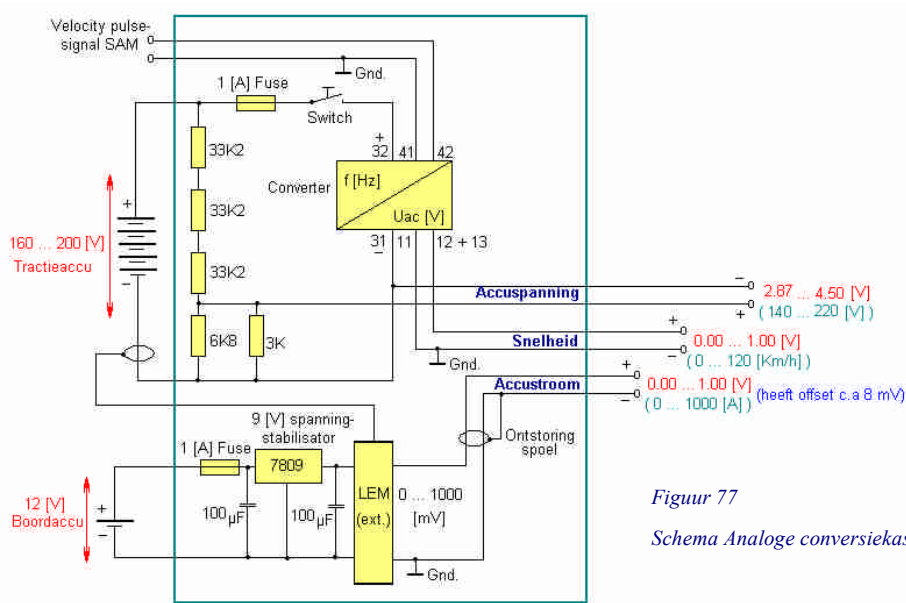
§ 10.1.1 Analoge conversiekastje

Naast het ontwerpen van regelstrategieën; een converter behuizing; een converter stroombuis en het maken proefopstellingen en het uitvoeren van metingen, was het ontwerpen van een analoog conversie kastje ook één van de activiteiten van de stage. Dit analoog conversiekastje staat hieronder weergegeven in gesloten en geopende toestand:



Figuur 76 Analoge conversiekastje

Het analoge conversiekastje ziet er schematisch uit zoals in de nu volgende figuur is weergegeven.



Figuur 77

Schema Analoge conversiekastje

Bij dit analoge conversiekastje is er gebruik gemaakt van een component (pulsteller) die van de puls frequentie, afkomstig van de “DC / AC – converter” van “SAM”, een spanning maakt die varieert tussen de 0 en 1 volt (zie bovenste grote gele blok in schema hierboven). Ook is er gebruik gemaakt van een LEM ampèretang die de accustroom ‘vertaalt’ in een spanning tussen de 0 en 1 volt. De LEM krijgt zijn voeding van een 7809 spanningstabilisator van “Philips”, ontkoppeld door condensatoren aan de ingang en uitgang, en ontleent op zijn beurt weer zijn voeding aan de boordaccu. Deze boordaccu spanning kan tevens de “MABX” voeden, en in serie met een éxtra accu tevens de “Wago” module.

§ 10.1.2 De “Wago” module

Voor de conversie van de ‘geschaalde’ analoge signalen naar een digitaal signaal, waarbij ook de vier “K” thermokoppel signalen – buiten het analoge conversie kastje om – aangebracht zijn, wordt er gebruik gemaakt van een A/D – converter module van “Wago”. Zo’n module ziet er als volgt uit:



Figuur 78

“Wago” A/D - module

Voor de oranje connector aan de linker zijde van de “Wago” module wordt er een zgn. CAN datalijn met gelijknamig besturingsprotocol toegepast. Deze CAN – lijn wordt aan de “MABX” doorverbonden. De “MABX” zal in de nu volgende paragraaf worden besproken.

§ 10.1.3 De "Micro AutoBoX" (MABX) van "dSpace"

De "MABX" real – time computer van "dSpace" is de boordcomputer welke uiteindelijk, softwarematig, het gehele proces van de "SAM" met brandstofcel moet 'controllen', ofwel: meten, regelen en aansturen. Het 'hardware' component van de "MABX" staat hieronder weergegeven.



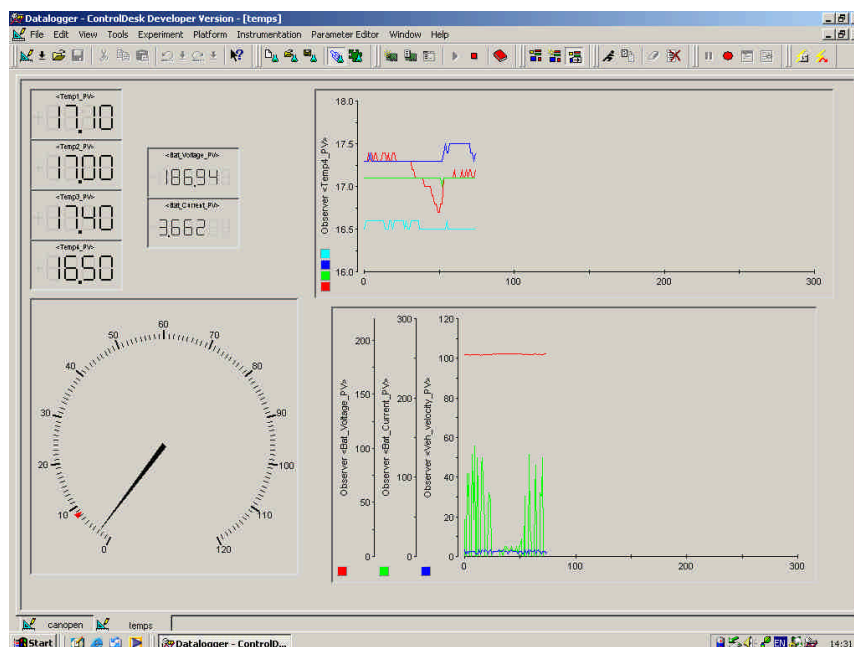
Figuur 79

De "MABX" van "dSpace"

Het idee van deze "MABX" is, om in de lijn van de derde regelstrategie zoals beschreven in § 8.3 te blijven, om accuspanning en stroom te meten, en met de gemeten stroom de brandstofcelkleppen aan te sturen. De flow H_2 is, zoals eerder als is aangegeven, evenredig met de stroom, en hieruit volgt ook direct een 'setpoint' voor de compressor. De "DC / DC – converter" zal met hetzelfde 'setpoint', synchroon aan de traagheid van de brandstofcel worden aangestuurd met U_{sp-2} . Het setpoint zal de 'verlangde' stroom uit de accu's bevatten met daarbij opgeteld, indien noodzakelijk, de absolute accuspanning onder de gewenste nominale totaalspanning van het gehele seriegeschakelde accupakket, gedeeld door de gemiddelde interne accuweerstand ($380\text{ m}\Omega$ per accu x 14 accu's = $5,3\Omega$).

§ 10.1.4 De laptop met "Control Desk" van "dSpace" toegepast bij de "MABX"

De laptop, waarvan tijdens alle activiteiten van de stage gebruik gemaakt is, is ook in de "SAM" geplaatst tijdens een testrit. Hiervan is onderstaande "dSpace" voorbeeld weergegeven:



Figuur 80

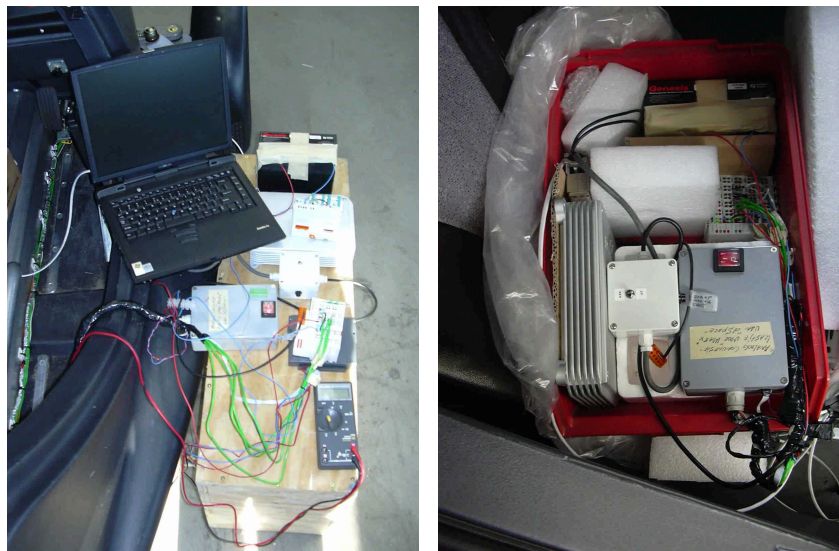
Control Desk voorbeeld

De temperaturen van de vier "K" thermokoppels worden hierbij in de grafiek en de displays linksboven weergegeven. De bovenste display van de rechter twee displays geeft de momentane accuspanning, en de onderste geeft de stroom die momentaan uit de accu's wordt getrokken. De grote wijzer (gauge) geeft de momentane snelheid van de "SAM" weer. Verder wordt dit alles geplott in grafieken (plotters).

§ 10.2 Ondervindingen bij meting met de “MABX” in de “SAM”

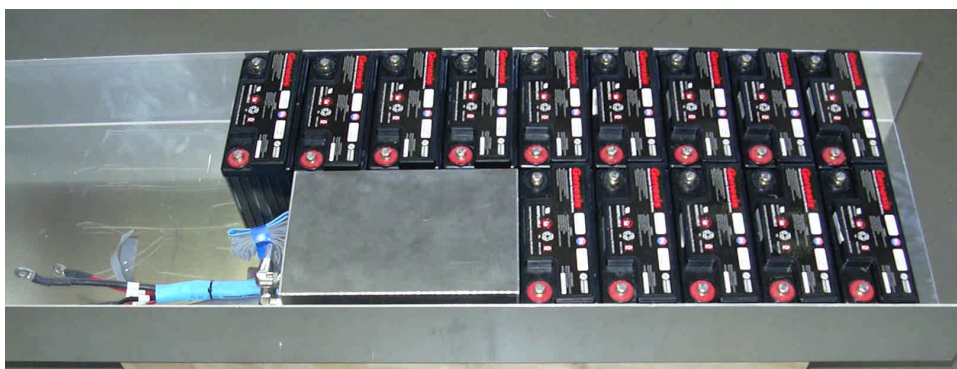
De meetdata afkomstig van de “Fluke – datalogger” en “MABX” is aanleiding geweest voor een uitvoerig (statistisch) onderzoek naar de eigenschappen van het systeem van de “SAM”. Hiervan wordt in hoofdstuk 11 verslag gedaan.

Onderstaande foto's geven ons enkele ‘actieshots’ waarbij de linker foto de meetopstelling weergeeft buiten de “SAM” alvorens de testrit met de “MABX” aanving, en de rechter foto laat ons een weergave zien van dezelfde apparatuur maar dan tijdelijk ondergebracht in een kunststof kist op de meerijderstoel achterin de “SAM” waarmee gemeten is.



Figuur 81 Actieshots van meetapparatuur (“MABX”) ‘in’ de “SAM”

Uiteindelijk zullen de 13 Ah accu's en de “DC / DC – converter” tezamen met de F.C. en appendages (laatste twee niet weergegeven) in de nieuwe ‘spine’ van de “SAM” zijn gesitueerd. Ook hiervan is hieronder nog een ‘actieshot’ gegeven:



Figuur 82 Actieshots van 13 Ah accu's en “DC / DC – converter in de ‘spine’

Twee kleine ‘oneffenheden’ / ‘schoonheidsfoutjes’ die bij meetopstelling van figuur 75 niet onbenoemd mogen blijven, en in de nabije toekomst wellicht verbetering verdienen, zijn:

- Toegepaste resolutie ‘bereik’ van de “Wago” module;
- Eliminatie van storing van de meetkabels.

We hebben voor wat betreft de meting te maken met een “Wago” module die slechts in beperkte verscheidenheid van typen zijn te bestellen binnen het bestek waarin wij onze analoge signalen aanbieden (er is overigens al enigszins getracht de toegepaste meetrange al wat beter te benutten).

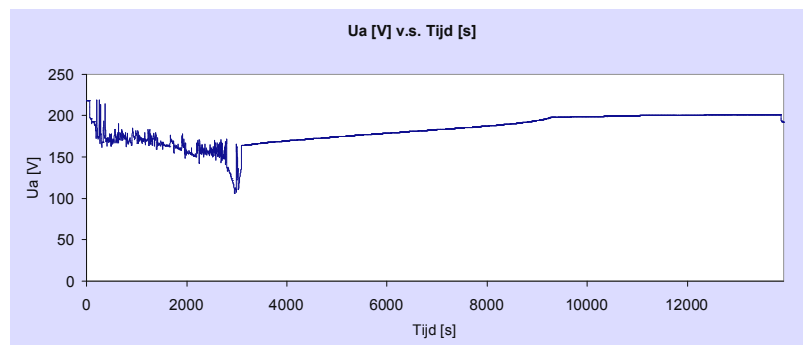
Voor het accu spanning referentiesignaal gebruiken we namelijk slechts 8 % $((4,50 - 2,87) / 20 \times 100)$ van de meetnauwkeurigheid / resolutie van de "Wago" module want de module meet van -10 tot $+10$ volt. Voor de snelheid en accustroom referentiesignalen gebruiken we echter maar 5 % $(1/20 \times 100)$. Aangezien we met 16 bits "Wago" modules te maken hebben, die ook nog enkele start- en stop-bits hebben, kunnen we maar 12 bits per module effectief benutten, en dit zijn $2^{12} = 4096$ meetwaarden. Het accu spanning referentiesignaal zal, met voornoemde percentages, maar 327 waarden kunnen gebruiken, wat in de praktijk in het ergste geval zal resulteren in $U_a \approx U_{a, \text{gemeten}} \pm 0,7$ volt $(220 / 327)$. Het snelheid referentiesignaal zal hiervan maar 204 waarden kunnen gebruiken, wat in de praktijk in het ergste geval zal resulteren in $v_{\text{SAM}} \approx v_{\text{SAM, gemeten}} \pm 0,5$ Km/h $(100 / 204)$. Het accustroom referentiesignaal zal hiervan eveneens maar 204 waarden kunnen gebruiken, wat in de praktijk in het ergste geval zal resulteren in $I_a \approx I_{a, \text{gemeten}} \pm 1,5$ A $(300 / 204)$. Dit alles resulteert dus in een ietwat minder nauwkeurige resolutie van de meetsignalen, en verlangt hiermee een verbetering in de toekomst. De thermokoppel modules leveren hierbij echter geen probleem op, omdat de "Wago" modules speciaal voor "K" thermokoppels voor te programmeren zijn, wat in ons geval zal resulteren in een meetnauwkeurigheid van nagenoeg 100%. Hierdoor zal voor de temperatuur, in het ergste geval, gaan gelden: $T \approx T_{\text{gemeten}} \pm 0,02$ °C $(80 / 4096)$.

Verder is tijdens het meten gebleken dat we te maken krijgen met verstoringen van onze meetsignalen, en is gebleken dat de S.N.R. ("Signal Noise Ratio") niet binnen toelaatbare proporties ligt voor zowel de meting van de accustroom en snelheid referentiesignalen. Dit geldt overigens alléén voor meting met de "MABX" en niet voor de meting met de datalogger van "Fluke".

In Figuur 80 in de grafiek rechtsonder staat de accustroom weergegeven, deze is zéér piekerig. Dit komt door het feit dat de stroom in de "MABX" wordt opgeschaald met een factor 1000, en zo ook de stroomsignalen (een mooi voorbeeld van verstoring). Dit kan ontstaan wegens het feit dat de signalen in de datalogger door een laagdoorlaatfilter gaan, en bij de "MABX" niet. Hiermee is het raadzaam de meetkanalen van de "MABX" met een condensator van 1 mF af te koppelen. Omwille van de tijd is hiervoor in de stageperiode helaas geen tijd meer geweest, en schaaft voorgaande zich daarom onder de noemer 'schoonheidsfoutjes'. De werking van de meting ansich is op zichzelf goed geslaagd, en wellicht kunnen coaxiale kabels in de toekomst uitkomst gaan bieden; eigenlijk mogen voornoemde zaken, ook vanwege het feit dat de "SAM" nog vóór de installatie van de F.C. zeker nog één keer uit elkaar gehaald moet worden, vooralsnog een niet al te grote naam hebben.

§ 10.2.1 De acculader van de "SAM"

In deze paragraaf zullen we nog even kort ingaan op het gedrag van de acculader tijdens het laden van een volledig leeg gereden accupakket. Het oplaadgedrag is in het rechter deel van de figuur hieronder te zien. Ook is in het linker deel van de figuur te zien hoe leeg we de accu's kunnen rijden zonder ze te beschadigen ...



Figuur 83 Ontladen en laden van het accupakket van "SAM" bij 14 accu's van 26 Ah

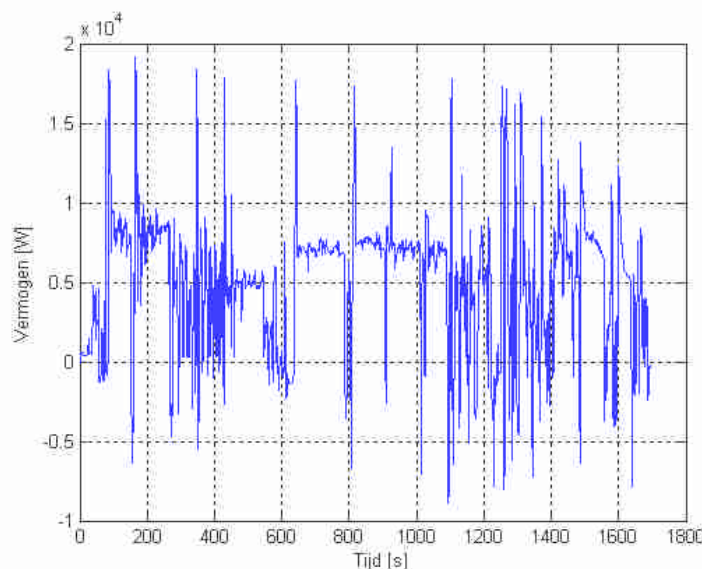
De accu spanning van het totale pakket kan teruglopen tot c.a. 110 volt (7,8 volt per accu, ofwel: 1,3 volt per cel). Met een leeggereden accu bedoelen we in dit geval een accu spanning waarbij de "SAM" gevoelsmatig niet meer reageert op het nog verder intrappen van het gaspedaal. Verder is te zien dat de acculader van "Zivan" een lader is, welke tijdens het laden van de accu's éérst de stroom constant houdt en de spanning geleidelijk opvoert met $dU/dt = 3,4$ mV/s, en later de spanning constant houdt en de stroom laat toenemen. We hebben hier dus te maken met een zgn. 'intelligente' snellader.

Hoofdstuk – 11 Meetdata onderzoek algemeen

Omdat de metingen met de “Fluke – datalogger”, vanwege de kleine stoorsignalen, vooralsnog ietwat betrouwbaarder zijn gebleken dan de metingen met de “MABX” van “dSpace”, zal het (statistische) onderzoek van de meetdata alléén worden toegelicht aan de hand van de datalogger meetdata. Hieruit komen opmerkelijke zaken naar voren die voor een groot deel al zijn verwerkt in dit verslag. Dit hoofdstuk is opzettelijk achter in het verslag geplaatst vanwege de lager veronderstelde prioriteit t.o.v. het voorgaande, en wegens het feit dat dit verslag ook wordt geschreven in dezelfde volgorde als waarin de stage is verlopen.

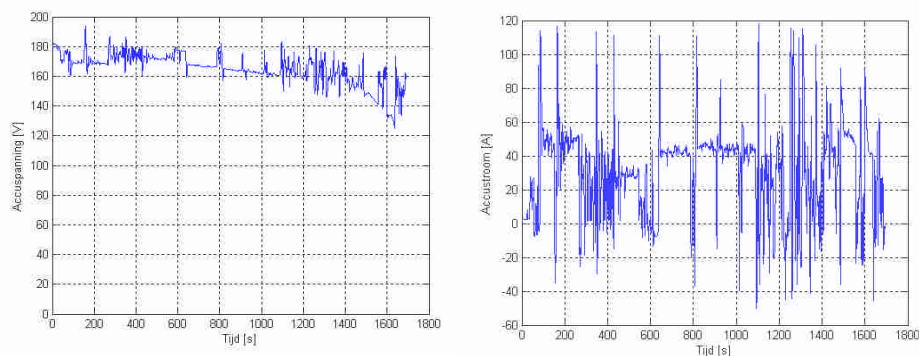
§ 11.1 Karakteristieken van de “SAM”

Het vermogensgedrag van de “SAM” kunnen we, na het uitvoeren van een meting waarbij o.a. accu spanning en stroom worden gemeten, als volgt representeren:



Figuur 84 P_{sam} v.s.

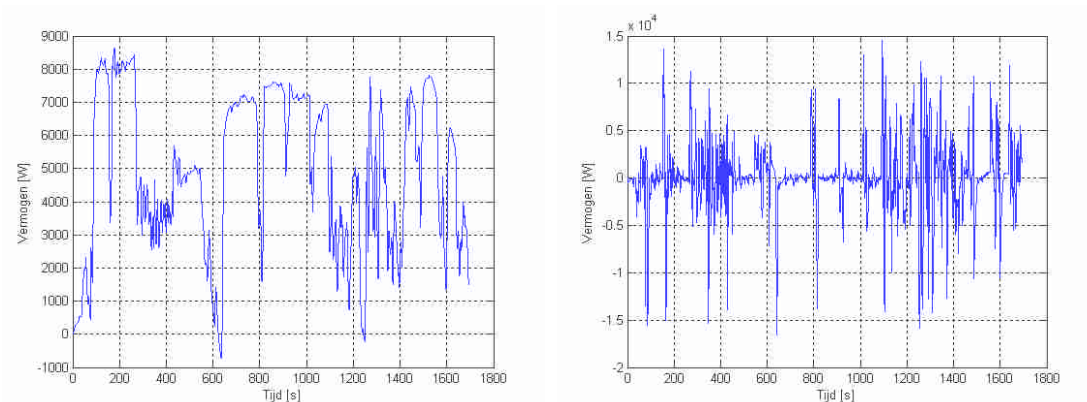
Het gemiddelde vermogen is hierbij c.a. 4,9 KW. Deze vermogenscurve is verkregen uit het product van accu spanning en accustroom welke hieronder zijn weergegeven:



Figuur 85 U_a en I_a v.s. Tijd

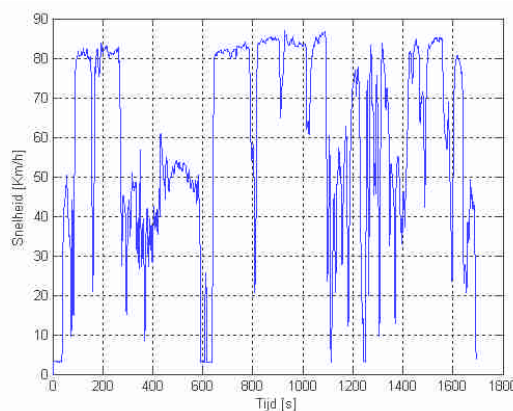
Voor de accu spanning kunnen we een gemiddelde waarde vinden van c.a. 164 V en voor de stroom een waarde van c.a. 30 A, hetgeen vermenigvuldigd inderdaad zo'n 4,9 KW oplevert.

Het gedrag van de brandstofcel, verkregen uit een systeemoverdracht met een tijdsconstante van 15 seconde, is hieronder weergegeven, met rechts daarvan het gedrag van de accu (vermogensvraag van de accu).



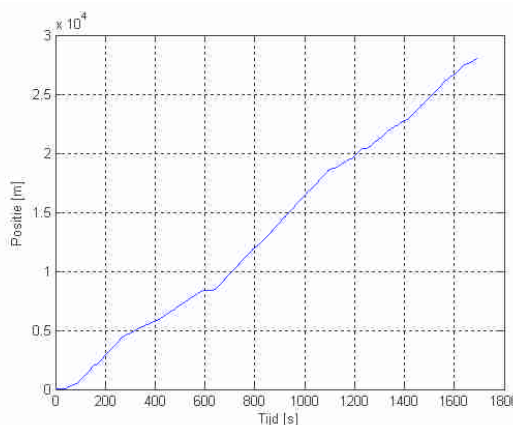
Figuur 86 Pfc & Pa v.s. Tijd

De linker figuur geeft ons te kennen dat een 'stack' van 8 KW inderdaad geen overbodige luxe is, en de rechter figuur laat zien dat de 'dynamiek' van het systeem in de accu's gaat zitten, waardoor de 'stack' deze dynamica van het systeem wordt onthouden. Verder is hieronder nog het rijgedrag weergegeven in Km/h.



Figuur 87 v_{sam} v.s. Tijd

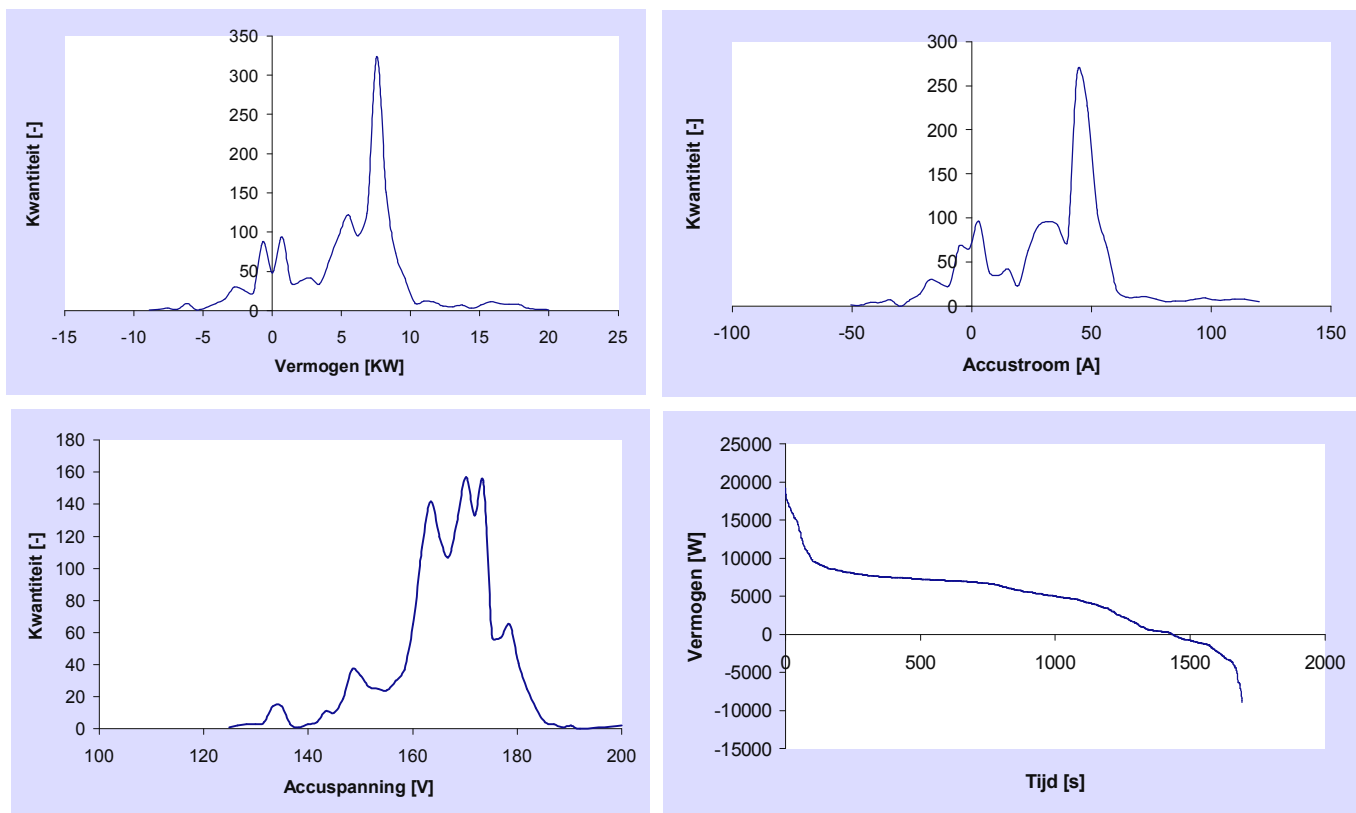
Volgens de specificaties van de "SAM" zijn er topsnelheden haalbaar van 90 Km/h, maar deze meting is wat rustiger verlopen (windstille situatie). Wél zijn er metingen gedaan waarbij topsnelheden van bijna 100 Km/h zijn bereikt. In figuur 54 is te zien dat er niet veel grotere acceleraties van 2 m/s^2 mogelijk zijn. Omdat we weten dat: $a = dv/dt$ en $v = dp/dt$, zal voor de positie "p" gaan gelden:



Figuur 88 Positie SAM v.s. Tijd

Dit komt overeen met de kilometerstand van de "SAM", want er is inderdaad zo'n 28 Km gereden in deze test.

De mate waarin voornoemde metingen, voor wat betreft vermogen, accuspanning en accustroom voorkomen wordt in onderstaande histogrammen weergegeven:

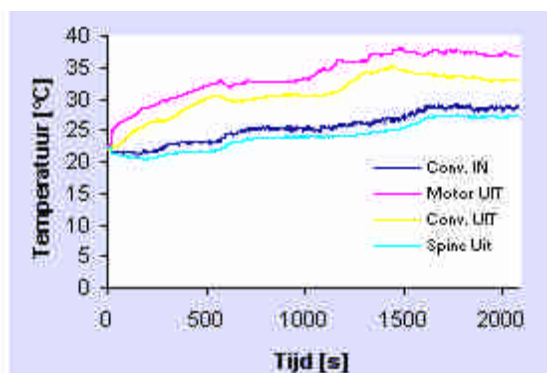


Figuur 89 Boven: Hist. Psam & Ia, Beneden: Ua & Psam (from "upper" to "lower")

De hoogste 'uitschieters' zijn hierbij een vermogensvraag van c.a. 7,5 KW, een accustroom van c.a. 45 A en een accuspanning van c.a. 170 V. Hiermee zijn de voornaamste systeemp parameters van "SAM" in kaart gebracht. Figuur rechts onder geeft nog even de vermogens van "SAM" van groot naar klein gedurende de test (1695 seconden). Hierbij is het laatste negatieve deel dat deel wat door regeneratief remmen is ontstaan.

§ 11.2 Meting temperaturen in de "SAM"

Ook is er met de "SAM" een meettest gedaan ten bate van de koelcapaciteit van het glycol koelcircuit, waarvan onderstaande figuur het resultaat is.

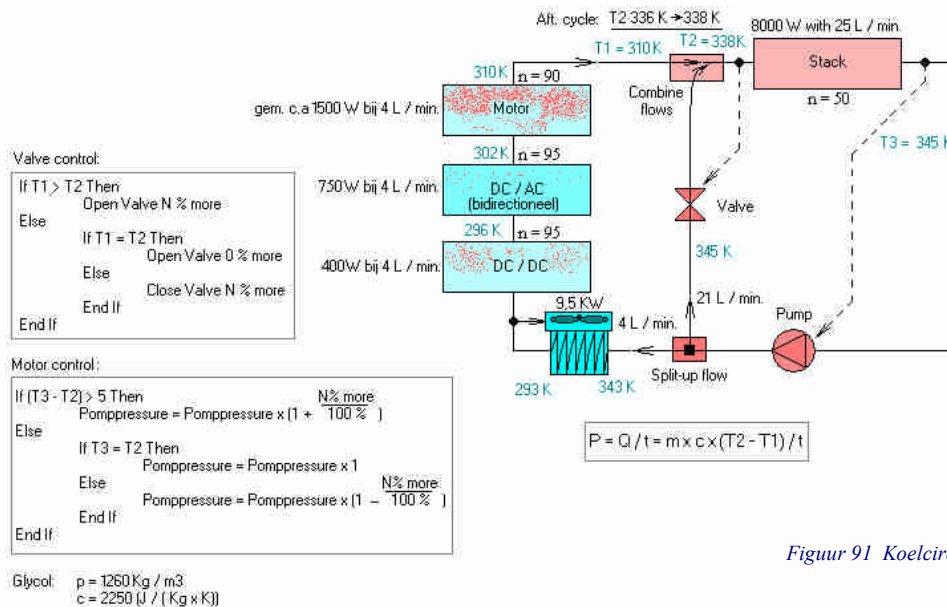


Figuur 90 Temp.'s SAM v.s. Tijd

Bovenstaande meting is verricht bij een buitentemperatuur van 17°C en een windkracht van c.a. 5 Bft.. De afstand waarover gereden is was c.a. 30 Km. Aangezien de dT tussen ingaande stroom glycol en uitgaande stroom glycol (0,5 l/min.) bij een constante vermogensvraag van 8 KW 15°C is, betekent dit

dat de maximale temperatuur van de converter in bovenstaande koelcircuit opgenomen tegen de 50°C zal zijn, en dat is nog goed toelaatbaar voor de elektronica die 60 °C ook nog best nog een tijdje voor zijn kiezen kan krijgen.

De vloeistofpomp van “Bosch” die in dit koelcircuit wordt toegepast blijkt, na meting in het systeem van de “SAM”, een flow van c.a. 0,7 l/min. te kunnen leveren bij een druk van 165 mBar boven atmosferisch. Hiermee is de koelcapaciteit zelfs nog wat groter, en de systeemtemperatuur minder kritisch. Het koelcircuit, zoals dat wellicht in “SAM” gaat worden toegepast en waarbij een deel van de vloeistofstroom glycol van het koelcircuit van de ‘stack’ afgetapt zal worden, gaat er als volgt uit zien:



Figuur 91 Koelcircuit SAM

Hiermee is de koeling van de “DC / DC – converter” goed mogelijk gebleken, zelfs in het al bestaande koelcircuit van “SAM” bij de zojuist genoemde 0,7 l/min.. De rendementen (“n” waarden zoals in bovenstaande figuur staan weergegeven) zijn ontstaan door de wetenschap dat:

$$h = \frac{P_{af}}{P_{toe}} \cdot 100 \text{ [%]}$$

“P_{af}” is hierbij de nuttig toepasbare afgegeven energie, en “P_{toe}” is het totaal aan toegevoerde energie. Er kan hierbij gesuggereerd worden dat: P_{toe} – P_{af} = P_{warmte}. Uiteraard gaat energie nooit verloren, maar “P_{warmte}” wordt bij ons niet teruggewonnen en hiermede beschouwd als zijnde ‘verlies’. Het rendement van de brandstofcel wordt in bovenstaande schema ietwat naar beneden afgerond tot c.a. 50 % (werkelijk c.a. 56 %) om ons niet te ‘rijk’ te rekenen voor wat betreft de koelcapaciteit.

Ook controleren we nog even in het kort of het aangenomen debiet niet de eerder in dit verslag genoemde 4 m/s zal overschrijden.

$$\dot{m} = r \cdot v \cdot A = 21 \cdot 10^{-3} / 60 \cdot 1260 = 1260 \cdot v \cdot 0,25 \cdot p \cdot (15 \cdot 10^{-3})^2 \Rightarrow v = 1,980 \text{ [m/s]}$$

We zitten dus een ruim behaalde factor 2 beneden de maximaal toelaatbare (massa-)stroom [debiet], Hiermee voldoet het schema van de koeling van de ‘stack’. Nu de aftakking van het circuit met een flow van 4 l/min.:

$$\dot{m} = r \cdot v \cdot A = 4 \cdot 10^{-3} / 60 \cdot 1260 = 1260 \cdot v \cdot 0,25 \cdot p \cdot (6 \cdot 10^{-3})^2 \Rightarrow v = 2,357 \text{ [m/s]}$$

Ook dit zit binnen de grenzen van het maximaal toelaatbare debiet, dus: het koelcircuit voldoet.

Hoofdstuk – 12 Slotwoord

In dit verslag is in beknopt formaat datgene beschreven wat zich gedurende de afstudeerstage aan activiteiten heeft voorgedaan. Hierbij is gepoogd de ‘rode draad’ door de stageperiode aan te houden.

Uiteraard zijn er tijdens de stageperiode bepaalde zaken aan de orde geweest die op zichzelf buiten het kader van dit verslag vallen, maar toch behoorlijk tijdrovend zijn geweest. Hierbij kan gedacht worden aan zaken als: het in en uit elkaar halen van de “SAM” (is verschillende keren nodig geweest, en kost bij elkaar één dag), het verzamelen van meetapparatuur voor de meting, vergaderingen, bezoeken aan P.R.E. en meer van dat soort zaken.

Als richtlijn wordt door de “Hogeschool INHOLLAND Haarlem” voor de stage een periode van c.a. 100 werkdagen gehanteerd om de afstudeeropdracht tot een goed eind te brengen. Achterafgezien is aan de strokenplanning, zoals beschreven in het P.V.A., behoorlijk goed tegemoetgekomen. Vrijwel alle hierin genoemde activiteiten zijn uitgevoerd, maar de meting aan het systeem van “SAM” met drie ‘stacks’ van tezamen 8 KW bleek niet mogelijk. Hiertoe zijn er in dit verslag karakteristieken van wat kleinere cellen ‘opgeschaald’, wat een redelijk reëel beeld geeft van de werkelijkheid.

Hieronder nog even een laatste foto van de “SAM” met daarvoor twee F.C. ‘stacks’ (waarvan er nog één gemaakt moet worden voor de “SAM”), met op de achtergrond het pittoreske duinlandschap van Petten. In de volgende hoofdstukken volgen er enkele aanbevelingen en een samenvatting van conclusies die in de tekst genoemd zijn.



Figuur 92 SAM + F.C.'s

Hoofdstuk – 13 Aanbevelingen

Gedurende de stage is er 'tegen' bepaalde zaken op gelopen waarvoor in de nabije toekomst nog een sluitende oplossing gevonden moet worden, of waarbij nog bepaalde zaken aangepast moeten worden. Om bepaalde zaken in het verdere verloop van dit "F.C. – SAM" project wat soepeler te laten verlopen, volgt hieronder een korte samenvatting van aanbevelingen / ondervonden 'problemen':

Het openen van de 'spine' van de "SAM", daar waar alle huidige aandrijf- apparatuur in verborgen zit welke in de toekomst ten dele zullen worden vervangen door de 'stack' e.d., moet plaats vinden in de volgorde waarin de fabrikant dat in de handleiding weergeeft.

Afscherming van data - kabels van accuspanning, accustroom en snelheid in de 'spine' is noodzakelijk om het 'oppikken' van velden (verstoringen) te voorkomen. Het verdient aanbeveling hiervoor in de toekomst coaxiale kabels (coaxkabel) te gaan gebruiken. De "K – thermokoppel" compensatiekabels (groen voor "K" type evenals de kleur van de thermokoppels en thermokoppel – contra stekers) hebben dit probleem echter niet, want deze zijn intern al afgeschermd.

Het is aan te bevelen de brandstofcel regelkleppen en het F.C. (spanning -) 'setpoint' van de "DC / DC – converter" uitsluitend met de accuspanning en accustroom (als parameter) te regelen, om zo onnauwkeurigheid van de regeling t.g.v. extra (en mogelijk versturende) parameters te voorkomen.

Tevens is het aan te bevelen systeemparameters zoveel als mogelijk binnen het 'bereik' van de toegepast "Wago" modules te krijgen om zo zoveel mogelijk gebruik te maken van de beschikbare bitbreedte en de resolutie v/d meting zo hoog mogelijk te houden.

De systeemparameters die in de "MABX" binnen komen moeten d.m.v. een capaciteit (c.a. 1 mF) 'afgekoppeld' worden, om zo stoorsignalen meer te compenseren ('filterende' eigenschap).

Dergelijke punten zijn, ten dele, ook in de conclusies (zie volgende hoofdstuk) doorgevoerd.

Hoofdstuk – 14 Conclusies

Als regelconcept is het aan te bevelen juist die regelparameters toe te passen die ons de meeste 'zekerheid' verschaffen (meest stabiele / nauwkeurige parameters). De momentane stroomvraag kan bijvoorbeeld behoorlijk piekerig verlopen (grote dI/dt) maar kan na software en / of hardwarematige filtering ten dele – of soms zelfs geheel – worden gecompenseerd. Hiermee verdient het derde en tevens laatstgenoemde regelconcept wellicht de meeste voorkeur.

Tijdens de ontwikkeling van het tweede regelconcept is de gedachte ontstaan zoveel mogelijk systeemparameters toe te passen voor de regeling om zodoende op ieder moment de vermogensbalans op te stellen. Hierdoor zijn er tevens teveel onzekere variabelen ingeslopen die theoretisch het verhaal ogenschijnlijk mooi 'sluitend' maken, doch in de praktijk voor grote afwijkingen kunnen zorgen. Een mooi voorbeeld hiervan is bijvoorbeeld de benadering van de C_d waarde van het frontale oppervlak van de "SAM", deze zal namelijk aanzienlijk toe kunnen nemen als de "SAM" niet 'ideaal' vanaf de voorkant wordt aangestroomd.

De H_2 regelklep en compressor (c.a. 21 % O_2) van de brandstofcel kunnen direct met de momentane stroomvraag aangestuurd worden evenals het (direct daarin 'vertaalde') spanning (dan wel stroom) 'setpoint' van de "DC / DC – converter" (deze moet echter wel met de traagheid of tijdconstante van de 'stack' worden opgeregeld om zo een vermogensvraag van de 'stack' te verlangen op een tijdstip dat deze nog niet aan de uitgang daarvan beschikbaar is). Hier moet wel de stroom benodigd voor het 'aanvullen' van het 'te kort' aan S.O.C. bij opgeteld worden.

Het (spanning –) setpoint van de "DC / DC – converter" (referentiespanning voor het spanning – 'setpoint' van de F.C.) kan ook een permanente instelling van c.a. 8 V worden gegeven. Hierdoor staat de nominale spanning van de F.C. 'vast' op c.a. 114 V (bij c.a. 43 A geeft dit nagenoeg 5 KW overeenkomstig de gemiddelde vermogensvraag). De vermogensvraag van "SAM" kan periodiek 'uitschieten' tot ± 8 KW, maar dit is vaak maar kortstondig. De "DC / DC – converter" van "P.R.E." zal hierbij het spanning 'setpoint' altijd weer 'terugtrekken' naar beoogde setpointspanning van c.a. 114 V. Het spanningssetpoint van de F.C. ligt hiermee c.a. 25 % boven de aanvankelijk veronderstelde waarde van c.a. 90 V, waarbij Pfc maximaal is. Hierdoor ligt het rendement van de 'stack' ook enkele procenten lager, dus daarmee is het eerder veronderstelde rendement van 50 % (i.p.v. de theoretische 56 % volgens "Faraday") niet onrealistisch.

Verder is tijdens de metingen met de "SAM" gebleken dat de "DC / AC – bidirectionele tractie converter" pas écht regeneratief dienst gaat doen bij intrappen van het rempedaal waarbij er een minimale remversnelling van ruim $-1,3 \text{ m/s}^2$ ontstaat. Aangezien de versnelling van de "SAM" gebruikelijk ongeveer tussen de uiterste grenzen van -2 en $+2 \text{ m/s}^2$ in ligt, is de hiermee verkregen energie 'winst' zeer beperkt ($Q = \int P \cdot dt$ is bij regeneratieve remacties klein).

Literatuurlijst

Boeken:

- Harink S. "Voorbereiding ombouwen SAM naar F.C. – SAM", rapport ECN
Jaar van uitgave: 2002 CODE: W32-02
- Norman S. Nise "Control System Engineering", Wiley
Jaar van uitgave: 2000 ISBN: 0-471-36601-3
- Richard C. Dorf "Electric Circuits", Wiley
Jaar van uitgave: 2001 ISBN: 0-471-38689-8
- Richard C. Jaeger, "Microelectronic Circuit Design", WBC / McGraw – Hill.
Jaar van uitgave: 1997 ISBN: 0-07-032482-4
- Spoorenberg C.J.G. "Elektrische Netwerken", Nijgh & van Ditmar Educatief.
Jaar van uitgave: 1992 ISBN: 90 236 4041 1 / NUGI 169
- Tol C. "FCSAM", rapport ECN
Jaar van uitgave: 2002 CODE: E22-E-02
- Verne J. "The Mysterious Island part", Elsevier.
Jaar van uitgave: 1944

Internetadressen:

<http://www.altavista.com>
<http://www.ecn.nl>
<http://power.ece.uiuc.edu/balog.htm>
<http://www.fuelcelltoday.com>
<http://www.fuelcell-eur.nl>
<http://www.google.nl>
<http://www.hepi.com>
<http://www.hawker.com>

Foto's:

J. van Beek

Figuren; tabellen; grafieken:

J. van Beek
Site van "Hawker"
Site van "ECN"

Bijlagen

Bijlage – 1 Opdrachtomschrijving + Eindtermen

In deze bijlage zal, volledigheidshalve, het "Plan Van Aanpak" (PVA) kort en bondig worden toegelicht.

Dhr. ing. A.J. Ruiter van de afdeling "Technologische Services en Consultancy", de stagebegeleider van E.C.N., heeft de opdracht gegeven om het SAM – project te coördineren. De ontwikkeling van de "Up – Chopper" (DC / DC – Boost converter) is uit handen gegeven aan PRE b.v. (Power Research Electronics) te Dorst. Gedurende mijn stage moet er op toegezien worden dat de converter aan de, door het ECN opgestelde pakket van specificaties van eisen, voldoet. Het onderbrengen van deze converter in het aandrijfsysteem van de SAM zal, voor wat betreft mijn aandeel hierin, gepaard gaan met veel onderzoek in de vorm van metingen, berekeningen, onderhandelen e.d.. Kortom een zeer brede en interessante afstudeeropdracht waarbij vooral ook veel praktisch inzicht nodig is in zowel regeltechniek en elektrotechniek alsook organisatorische aspecten.

§ B1.1 Doelstelling

De SAM scooter heeft, zoals zojuist al is opgemerkt, een te kleine actieradius vanwege een minder duurzame aandrijving. Brandstofcellen moeten hierbij uitkomst gaan bieden. Op basis van brandstofcellen houdt de afdeling "Schoon Fossiel" zich bezig met de ontwikkeling, praktijkproeven en marktintroductie van schone voertuigen. Daarmee kan een belangrijke stap worden gezet in het terugdringen van de uitstoot aan NO_x, fijn stof, koolwaterstoffen en geluid. In 2001 zijn de effecten van brandstofvoertuigen op de uitstoot van broeikasgassen, en fijn stof, beschreven in een literatuurstudie. Hieruit bleek dat bussen en vrachtwagens, die met brandstofcellen zijn uitgerust, voor een drastische reductie van de uitstoot kunnen zorgen. De afdeling "Technologische Services en Consultancy" heeft in het SAM project haar aandeel in de vorm van ontwikkeling van een inverter schakeling of Up – chopper (DC / DC converter), waar de afstudeerstage zich voor een overgroot deel op toespitst.

§ B1.2 Probleemstelling

Het spanningsniveau van de batterijen varieert van 190 V tot 210 V. De state of charge varieert navenant tussen 20 en 100%. De brandstof cel levert een spanning van 140 V onbelast (0 A) en 80 V belast (80 A). Het nominale vermogen van de brandstofcel – zijnde 7 kW – moet derhalve worden overdragen van 90 V naar een niveau van 190 V tot 210 V met een zogenaamde Up - chopper. De conservatieve oplossing is nu om een 7 kW inverter toe te passen. Het nadeel is dat het volle vermogen omgezet wordt, dus bij een rendement van 90%, wordt 10 % van het opgewekte vermogen in warmte omgezet; voorts is de beschikbare ruimte in het voertuig beperkt.

§ B1.3 Oude concept

Indien het accupakket, in twee stukken wordt gesplitst, ontstaat over elk pakket een spanningsniveau van 85 tot 95 V. De brandstofcel levert nominaal 90 V. De opvatting bestond dat de cel bijna rechtstreeks een pakket kan laden met een maximale laadspanning van 95 V bij 0 A en maximale laadstroom van 77 A bij 85 V. Indien de brandstofcel spanning hoger is dan het potentiaal van het betreffende pakket, dan down - choppen en indien de celspanning lager is, dan up - choppen. De celspanning van 90 V, wordt galvanisch gescheiden omgezet naar circa 5 á 10 V en telt deze op bij de celspanning. Op deze manier hoeft slechts 10 V · 77 A (geeft 770 W) te worden overgedragen. Indien deze inverter (conservatief gesproken) ook 10% verliezen geeft, dan is dat 77 W hetgeen in ieder geval tien keer lager als de standaard oplossing. Nadat het betreffende pakket geladen is, wordt er overgeschakeld op het andere pakket. Telkenmale wordt de state of charge van beide pakketten gevisualiseerd (monitoren).

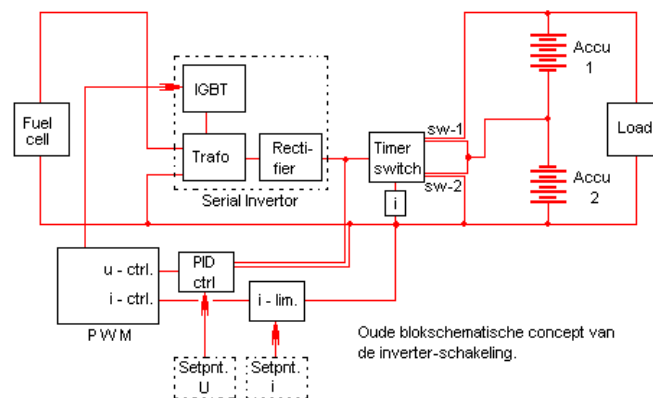
Realisatie. *Ontwerp een down - chopper met de volgende specificaties:*
- Input: 140 tot 80 V (DC) bij 0 tot 80 A (DC);

- Output: 0 tot 10 V (DC) @ 80 tot 0 A (DC);
- Power conversie: c.a. 800 W;
- Efficiency: 90 % ... 95 %.
- Fabriceer een Puls Width Modulator, rated frequency: 50 KHz ... 70 KHz (conform bestaand schema);
- Kies een juiste ferriet kern met dienovereenkomstig kernvermogen bij de nominale frequentie, en kies de juiste wikkilverhouding en wikkelmethode (ortagonaal);
- Laat de trafo fabriceren bij "Wijdeven" en kies de juiste igbt's (Isolated Gate / Base

Turn-off

schakeling) én drive koppeling.

De regelstrategie is een stroombrongestuurde inverter met spanningsbegrenzing. Het integreren van een PID regelaar moet gerealiseerd worden m.b.v. D-space (of "Matlab"). Het aansturen van een "Timer switch" (b.v. door een PWM [Puls Width Modulation] circuit), zal op tijd de voeding overschakelen van het ene dan wel het andere pakket (zie onderstaande schematisering).



Aangezien brandstofcellen gevoelig zijn voor overbelasting (bij een grote 'vraag' naar energie vanuit het aan te drijven systeem) is er een concept bedacht waarbij het werkgebied van de brandstofcel wordt bepaald over één helft van het totale accupakket, m.a.w. het vereiste vermogen uit de cel is afhankelijk van de spanning welke door één helft van het accupakket wordt 'opgedrukt'. Dit concept kan men benoemen als een "geschakelde koppeling". Desalniettemin is gebleken dat de 'opgedrukte' spanning dermate hoog is dat de brandstofcel, qua spanningsniveau, niet voldoende tegemoet kan komen aan de vereiste spanning van het systeem, en zal er een zgn. inverter schakeling (c.a. 0,7 KW) ontworpen moeten worden om zo, in combinatie met het al bestaande concept van de "geschakelde koppeling", middels superpositie wél aan de gestelde eis te voldoen.

Onderzoek zal moeten uitwijzen hoe de regellus van de inverter schakeling zo efficiënt mogelijk verwezenlijkt en geïmplementeerd kan worden om tegemoet te komen aan de gestelde eis.

§ B1.4 Nieuwe concept

Indien het accupakket, uit één deel bestaat, ontstaat over het accupakket een spanningsniveau van 170 tot 190 V. De brandstofcel levert nominaal 90 V. Indien, door een spanningsverhoging, de brandstofcel spanning hoger is dan het potentiaal van het betreffende pakket, dan down - choppen en indien de celspanning lager is, dan up - choppen. Hierbij geldt eveneens te maken met een stroombronsturing en een spanningsbegrenzing

Realisatie door PRE (Power Research Electronics b.v. te Dorst):

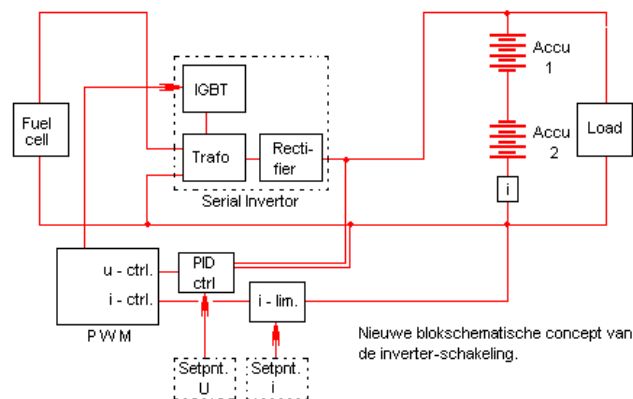
Ontwerp een Voltage Controlled DC / DC converter:

- Input: 140 tot 80 V (DC) bij 0 tot 80 A (DC);
- Output: 190 tot 210 V (DC) bij 40 tot 0 A (DC);
- Power conversie: c.a. 8000 W;
- Efficiency: 95 % ... 96 %.
- Fabriceer een Puls Width Modulator, rated frequency: 64 KHz (conform bestaand schema);

- Keuze van een juiste ferriet kern met dienovereenkomstig kernvermogen bij de nominale frequentie, en kiezen van de juiste wikkelverhouding en wikkelmethode (ortagonaal);
- Trafo fabricage en kiezen van de juiste igtb's (Isolated Gate / Base Turn-off schakeling) én drive koppeling.

Door PRE (Power Research Electronics B.V. te Dorst [N.L.]) is een schakeling ontworpen die qua principe lijkt op het bovenstaande schema, maar nu het totale accupakket in één keer geladen. Dit systeem is als volgt voor te stellen.

Schematische voorstelling van de “voltage controlled DC / DC – converter” regeling:



Nu is de timer switch komen te vervallen, omdat deze converter wél in staat is voldoende vermogen te leveren en zodoende het gehele (buffer-)accupakket in één keer te laden. In dit schema heeft men gebruik gemaakt van een klokpulsgenerator (Pulse Width Modulator) schakeling voorgesteld d.m.v. een UC3524A van “Integrated Circuits™” (terug te vinden op pag. 6-64 t/m 6-69 van het “Integrated Circuits™ “Product & Information Handbook 1995 – 96). Dit IC heeft zowel op pin 12 als pin 13 een collector (ingang) en stuurt met pin 11 en 14 (emitter uitgangen) beurtelings de trafo schakelspoelen aansturen. Deze trafo’s ‘betrachten’ zo beurtelings de IGBT (Isolated Gate / Base Turn-off) MOSFET vermogensschakelin. Deze schakeling is opgebouwd uit twee ‘takken’ met ieder vier RFP70N06 (70 A; 60 V; 0.014 Ω) N – channel power MOSFET’s (van “Fairchild Semiconductors™”). Als we echter méér van deze schakelingen (met elk twee van deze ‘takken’) parallel schakelen, dan kunnen we zo, via een rectifier (optimalisatielus), een groter vermogen aan de uitgang genereren.

Spanning en stroom worden vervolgens d.m.v. een PID controller (Proportionele Integreerende / Differentiërende controller) resp. stroombegrenzing – schakeling ‘bewaakt’, en dienen als regelsignaal voor de PWM controller.

§ B1.5 Projectactiviteiten

Tijdens de afstudeerstage kunnen we een aantal verschillende projectactiviteiten verwachten. Deze projectactiviteiten worden langs het klassieke “path of prototyping” uitgevoerd in onderstaande volgorde.

- Voorstudie opdracht;
- Omschrijving van de opdracht;
- Vaststellen van de specificaties;
- Ontwerp en realisatie;
- Controleren en coördinatie van werkzaamheden;
- Implementatie;
- Meten;
- Installatie;
- Afname product.

Voorgaande hoofdstukken geeft een korte beschrijving van de afstudeeropdracht. Het ontwerpen van de "Voltage controlled DC /DC converter" is in handen van PRE b.v. te Dorst. Gedurende de afstudeerstage moet er op toegezien worden dat aan de gestelde specificaties van eisen wordt voldaan, o.a. door verschillende deelactiviteiten te coördineren. Zo zal er door PRE een 8 W converter moeten worden ontworpen omdat de brandstofcel c.a. 7 W kan leveren tijdens 'stationair bedrijf' (converter heeft een ietwat zwaardere uitvoeringsvorm). Bij het opzetten van een proefopstelling, met als belangrijkste subsystemen: brandstofcel; voltage controlled DC / DC converter en aandrijfsysteem van de scooter, moeten er metingen worden verricht om meer inzicht te krijgen in de performance van het hele systeem. Hiermee zal het gedrag van ieder subsysteem onder de loop worden genomen, maar ook de invloed die deze verschillende systemen op elkaar uitoefenen. Uiteindelijk zal, naast toepassing van een brandstofcel systeem in de SAM, de brandstofcel óók voor tweewielige scooters worden toegepast. Dit valt niet direct binnen het kader van de afstudeeropdracht maar kan, indien er nog voldoende tijd over is, worden verwezenlijkt. Uiteindelijk is er de afname van het product door de opdrachtgever. De mate waarin het uiteindelijke systeem voldoet aan de eisen van de afnemer zal een belangrijke maat zijn voor de kwaliteit van het eindproduct.

§ B1.6 Projectgrenzen en randvoorwaarden

In dit deel zullen de projectgrenzen van de afstudeerstage worden afgebakend, om zo het uiteindelijke doel van de opdracht te beschermen. Indien deze grenzen niet zouden worden gesteld is het moeilijk om, tijdens uitvoering van de eigenlijke opdracht, te bepalen wat relevant dan wel irrelevant is voor het project.

Hoewel er in dit deel expliciet kan worden ingegaan op de inhoud van de verschillende deelactiviteiten, is het veel belangrijker om, naast het feit dat er aan de gestelde eisen van de opdrachtgever moet worden voldaan, begrippen als tijd en kosten in kaart te brengen.

In de offerte van PRE (ref. MK/50002 van 19-12-'02) staat beschreven dat de 8 KW Voltage controlled DC / DC converter een prijs heeft van 18000,- euro ex. (ofwel: 21420,- euro incl.). Deze prijs mag natuurlijk niet hoger worden dan in de offerte is aangegeven; ook het tijdsbestek waarin de converter gefabriceerd moet worden mag niet teveel uitlopen.

Hiernaast is het belangrijk om een degelijke strokenplanning te maken van welke deelactiviteiten elkaar zullen opvolgen gedurende dit project van de afstudeerstage. Ook dit maakt deel uit van de projectgrenzen van de opdracht, want vaak geldt: "tijd is geld evenals stilstand devaluatie is". Vandaar dat nevenactiviteiten die de doelstelling van de opdracht in het geding kunnen brengen vroegtijdig uit de weg moeten worden gegaan. Hierbij zal het kunnen gebeuren dat bepaalde dingen, hoe goed ook bedoeld, soms moeten worden uitgesloten. Een strokenplanning van het SAM – Project, analoog aan het "path of prototyping" zoals hierboven besproken, kan er simplistisch voorgesteld ongeveer als

Strokenplanning																								
	Datum	(nog te definiëren)																						
	Milestones																							
Voorstudie																								
Omschrijving opdracht																								
Vaststellen van de specificaties																								
Ontwerp en realisatie																								
Controleren en coördineren van werkzaamheden																								
Implementatie																								
Metten																								
Installatie																								
Afname product																								

volgt uitzien (totale planning: laatste pagina van deze bijlage).

§ B1.7 De producten

Tijdens de projectperiode worden er bepaalde activiteiten uitgevoerd. Hierbij ontstaan allerlei 'producten'.

Een 'product' kan in een breder verband worden gezien, en behoeft niet persé een voorwerpen te zijn. Óók een gebeurtenis kan een 'product' zijn.

Gedurende het project (in dit geval de afstudeerstage) zal er naar verschillende 'producten' worden toegewerkt. Hierbij is het belangrijk om einddata vast te stellen ("milestones" zoals deze, in de vorm van rode driehoekjes, in de strokenplanning zijn te zien). Teveel "milestones" wordt voorkomen om het geheel overzichtelijk te houden. Bepaalde deelactiviteiten kunnen onder één van de - in dit geval negen - hoofdgroepen van de strokenplanning vallen. Zo kan bijvoorbeeld dit "Plan van aanpak" als een deel van de voorstudie en / of opdrachtschrijving van het project worden gezien.

§ B1.8 Kwaliteitsbewaking van het project

Hierbij gaat het om de kwaliteit van de (tussen -)producten zoals deze in de voorgaande paragrafen zijn besproken. Gedurende het project zullen we, in het bijzonder tijdens het traject van: "Controleren en coördinatie van werkzaamheden" en "Implementatie" alsook het "Meten", de kwaliteit van het product in kaart proberen te brengen. Hiervoor moet er uiteraard veel onderhandeld worden met de personen van verschillende afdelingen of personen van verschillende bedrijven, om zo het een en ander in goede banen te leiden.

Door een constante 'terugkoppeling' tussen deelfasen als bijvoorbeeld "Meten" en "Vaststellen van specificaties" wordt er onafgebroken gecontroleerd in hoeverre deze aan elkaar stroken. Ook kan er een tussentijds provisie van één of meerdere 'tussenpersoon' noodzakelijk zijn. Ook moet er tijdens de voortgang van het project worden aangegeven welke normen; technieken; tekenvoorwaarden; software e.d. binnen de organisatie toegepast worden. Indien bepaalde voorwaarden niet voorhanden zijn, of bijvoorbeeld ongebruikelijke softwarepakketten toegepast worden, moeten hiervan aantekeningen worden gemaakt.

Gedurende de voortgang van dit project heeft een efficiëntere besteding van middelen (ter bevordering van de kwaliteit van het eindproduct) prioriteit boven het tijdsbestek waarin de opdracht moet worden gedaan. Vaak geldt namelijk dat het uitvoeren van een opdracht beter iets te lang kan duren maar in één keer goed is, dan dat de opdracht wordt afgeraffeld en uiteindelijk de beoogde kwaliteit niet wordt behaald, en tevens niet meer aan de gewenste tijdslimiet kan worden voldaan.

Ter bewaking van de kwaliteit van het eindproduct zal er een goede onderlinge communicatie moeten worden gehouden. Gedurende de afstudeerstage moet ook goed in de gaten worden gehouden of bepaalde doelen niet voorbijgestreefd worden of dat er onnodige activiteiten worden gedaan. Goede afspraken en een goede coördinatie moeten er toe bijdragen dat de juiste mensen (en / of middelen) op de juiste tijd en op de juiste plaats en in de juiste hoeveelheid beschikbaar zijn.

§ B1.9 Kosten / baten

Omdat deze afstudeeropdracht binnen een gestelde tijd (voor 15 juni) zijn voltooiing moet vinden moet er duidelijk aangegeven worden welke dingen wél en welke dingen niet relevant zijn. Hierbij wordt er een onvoor-ziene kostenpost toeslag van c.a. 10% gehanteerd, om zo aan de veilige kant van de begroting te zitten. Ook zal er gekeken moeten worden of bepaalde uitgaven opwegen tegen de gestelde specificaties van eisen en vice – versa. Hiervan blijkt een duidelijke motivatie vaak onontbeerlijk. Voor wat betreft de te verwachten kosten kunnen we (voorlopig) de volgende kostenposten sommeren:

- Huisvesting;
- Kosten voor onderzoek; ontwerp; assemblage; opslag e.d.;
- Metingen / hulpmiddelen;
- Toegepaste materialen / componenten;
- Werkgevers / stagiair;
- Vervoer / exploitatiekosten;
- Onvoorziene uitgaven (meestal toeslag van 10 % over het totaal aan kosten).

§ B1.10 Risicoanalyse

Alle zojuist besproken punten van dit P.V.A. zijn onder voorbehoud. Van tevoren is natuurlijk nooit exact in te schatten hoe een project precies zal gaan verlopen. Desalniettemin is dit plan van aanpak

wél een goede richtlijn voor het vorderen van het project. Niet onbelangrijk is ons te realiseren dat de volgende interne risico's zich kunnen voordoen:

- De haalbaarheid van het project;
- Een lange doorlooptijd van de deelprojecten;
- Een definitieve "deadline";
- Veel verschillende functionele deelgebieden;
- Onervarenheid van betrokkenen in bepaalde zaken;
- Onvoldoende / onvolledige inbreng van eisen / wensen van de eindgebruiker;
- Onvolledige (eenrichting) communicatie;
- Onduidelijke projectgrenzen door onvoorspelbaarheid in omschrijving van project;
- Niet voldoende mankrachten om op de juiste plaats; op de juiste tijd en met de juiste 'tooling' een bepaalde klus te klaren (door foutieve misverstanden / communicatieproblemen);
- Een andere doelstelling dan in het P.V.A. staat gedefinieerd.

Uiteraard wordt geprobeerd voornoemde punten zoveel mogelijk te voorkomen.

§ B1.11 Slotopmerking

Dit is een conceptueel plan van aanpak. De inhoud hiervan is en blijft onder voorbehoud en zal, na ondertekening van de stagebegeleider(s), als richtlijn worden aangehouden.

§ B1.12 Strokenplanning en werkpakketten

Zoals bij alles wat je van te voren probeert in te schatten: "in de praktijk gaat het vaak anders". Toch is het vaak wel raadzaam bepaalde deelprojecten 'in kaart' te brengen (door ze in werkpakketten op te splitsen) en alvast een prognose te maken hoe het project waarschijnlijk zal verlopen. Hieronder is het (vermoedelijke) verloop weergegeven van het SAM project.

§ B1.13 Eindtermen

- De student kan zelfstandig en interdisciplinair werken;
- De student kan relevante info. v/d opdracht opsporen; selecteren en verwerken;
- De student kan voor technische problemen oplossingen / alternatieven genereren;
- De student beschikt over goede communicatieve vaardigheden in woord & geschrift.

§ B1.13 Prognose van de voortgang van het (FC)SAM project

(korte werkpakket omschrijving)

- Voorstudie deelsystemen:
 - Verslag van dhr. C. Tol (FCSAM) bestuderen / samenvatten;
 - Bestuderen "Voltage controlled DC DC – converter" van PRE;
 - Verslag van dhr. S. Harink (Voorbereiding ombouwen SAM naar FCSAM) bestuderen / samenvatten
 - PVA (Plan Van Aanpak) maken;
- Onderzoek lopende deelprojecten:
 - Bezoek aan PRE te dorst;
 - Besprekingen met dhr. D. Wouters (deels synchroon lopende "Fresco" project).
- Specificaties van eisen opstellen:
 - N.a.v. voorstudie en onderzoek van lopende projecten definitieve specificaties van eisen gaan opstellen (brandstofcel; converter; PID (DSPACE); meetsystemen; accupakket; aandrijfsysteem SAM; e.d.).
- Regeltechnische modellering deelsystemen (MATLAB):
 - Modelleren brandstofcel; converter; PID; Meetsysteem; accupakket; aandrijfsysteem e.d.
- Samenvoeging deelsystemen tot één regeltechnisch model (MATLAB):
 - Afzonderlijke systemen aan elkaar koppelen;
 - Mogelijke problemen, bij combinatie van deelsystemen, oplossen.
- Converteren regelmodel (MATLAB $\Rightarrow$ DSPACE):
 - Vertalen van het regeltechnische systeem van MATLAB in een DSPACE model.
- Opbouwen van het werkelijke systeem:
 - Alle beschikbare deelsystemen samenbouwen tot een werkelijk (regel)model;

- Verbeteringen aanbrengen in modelvorming en / of werkelijke systeem:
 - Ontstane problemen oplossen bij de opbouw van het werkelijke systeem hun bron beschrijven.
- Meten van het werkelijke systeem:
 - Werkelijke systeemp parameters (waar mogelijk grafisch) in kaart proberen te brengen.
- Rapportage van: metingen, bevindingen en berekeningen:
 - Meetwaarden (grafieken); ondervindingen (problemen e.d.) en tussentijdse berekeningen in een verslag onderbrengen.
- Maken aanbevelingen voor voortgang;
 - Voor projecten in de toekomst aanbevelingen en projectrichtlijnen geven.
- Afname product (transport; service e.d.).
 - Logistieke zaken regelen en service verlenen aan de afnemer installatie; uitleg e.d.

Op de nu volgende pagina is hiervan een totaal - strokenplanning weergegeven. Data staan nog niet helemaal vast (marge van $\pm 10\%$ is waarschijnlijk).

§ B1.14 Strokenplanning

[illegible]

Bijlage – 2 SAM (Cree AG)

Factsheet Produkt

Allgemeine Daten

Kategorie	Dreiradfahrrad (vorne 2, hinten 1 Rad)
Anzahl Sitze	2, hintereinander angeordnet
Antrieb	Elektrisch, über Zahnriemen auf Hinterrad

Antriebsmotor

Hersteller	Landert Bülach (Entwicklung Cree AG)
Nennspannung	168 V
Max. Phasenstrom	250 A
Leistung	15 kW ab 1800 U/min
Rekuperation	Max. 10 kW
Drehmoment max.	80 Nm ab 1800 U/min abgeregelt
Typ	Permanentmagnet Brushless
Anzahl Pole	12
Phasen	3
Untersetzung	Zahnriemenantrieb 5,54 : 1

Batterien

Typ	Hawker Genesis G12 26 Ah 10EP Reinblei-Zinn
Kapazität	C1 21 Ah
Anzahl pro Fahrzeug	14 in Serie / 168 V
Gewicht pro Batterie	10 kg

Leistungselektronik

Hersteller	Cree AG
Typ P	WM mit IGBT-Technik
IGBT-Typ	Mitsubishi IPM 400 DAS 060

Ladegerät

Hersteller	Zivan
Leistung	2,1 kW
Ladezeit Ganze Ladung	6 h (40% in 1 h / 70% in 2 h)

Fahrleistungen

Stromverbrauch Batterie	Ca. 5 kWh / 100 km Citybereich
Reichweite	50 bis 70 km
Höchstgeschwindigkeit	85 km/h
Beschleunigung	0 auf 50 km/h 7 Sek. mit 2 Personen

Gewichte, Masse

Gewicht leer mit Batterien	545 kg
Gewicht Batterien	140 kg
Zulässiges Gesamtgewicht	695 kg
Fahrzeuglänge	3162 mm
Breite	1553 mm
Höhe	1583 mm
Spurweite	1493 mm
Radstand	2392 mm

Materialien

Chassis	Aluminium (90% rezyklierbar)
Batterien	Blei (90% rezyklierbar)
Fahrgastzelle	Polyethylen (90% rezyklierbar)

Chassis, Karosserie, Fahrwerk, Lenkung

Chassis Zentraler verwindungssteifer Chassisträger aus extrudiertem Aluminium. Hohlraum zur Aufnahme der Batterien. Vorn und hinten je ein gegossenes Aluminium-Modul zur Aufnahme der Aufhängung. Aufhängung vorne Obere Querlenker, querliegende Epoxi-Blattfeder unten. Aufhängung hinten 2 Federbeine auf Schwingarm 3-Rad-Konzept. Stabilität und gutes Fahrverhalten durch 1 Rad hinten, 2 Räder vorne Lenkung Zahnstangenlenkung. Karosserie Doppelwandige, mit Luft gefüllte thermoplastische Fahrgastzelle zum Schutz von Fahrer und Passagier. Rotationsgussverfahren. Sitze Vorder- und Rücksitz hintereinander angeordnet und mit 3-Punkt-Sicherheitsgurten und eingebautem Überrollbügel ausgestattet.

Bremsen

Vorn und hinten:

Scheibe	2 Grauguss D = 240 mm Edelstahl D = 240 mm
---------	---

Zangen	Festsattel Schwimmender Sattel
--------	-----------------------------------

Hauptbremszylinder	Grauguss, zwei Kreise
Bremskraftbegrenzer hinten	Max. 25 bar
Handbremse	Mechanisch auf hintere Zange

Räder, Bereifung

Vorn und hinten

Felgen	3 ½ J 15H 2A-4-6	5 ½ J 15H 2-4-18
Reifen	Continental 135/70 R15	Michelin 175/65 R15 XT1 TL

Kosten	Fahrzeugpreis ca. 12'000 Schweizer Franken
--------	--

Weitere Informationen:	www.testsam.ch ; www.cree.ch
------------------------	---

Medienstelle:	SAM/Cree	Telefon: +41 (0) 1 261 44 60
Marianne Egli, Union 3 Communications		Fax: +41 (0) 1 261 44 18
Unionstrasse 3		E-Mail: info@union3.ch
8032 Zürich		

