

Woord vooraf

Om onze studie als master Energie, afstudeerrichting Automatisering af te ronden werd deze masterproef uitgevoerd. De masterproef bevat een literatuurstudie over demand side management systemen, een beschrijving van onze proefopstelling, metingen, conclusies en achterliggende theorie. Dit onderzoek werd uitgevoerd bij i-NET, gevestigd te Diepenbeek.

In dit project hebben we een beeld kunnen vormen over hoe onderzoek gebeurt in een onderzoeksinstelling. Hoe wordt een onderzoeksvraag opgesteld? Welke stappen komen tussendoor kijken? Hoe gaan we om met kostbare tijd wanneer er van het vooropgestelde praktische doel moet worden afgeweken en vooral hoe blijven we ondanks aanpassing zo dicht mogelijk bij het oorspronkelijke doel? We hopen u in ons werk deze verschillende stappen duidelijk te maken.

Graag willen we een woord van dank richten aan enkele personen die het mogelijk hebben gemaakt deze masterproef tot een goed einde te brengen.

Als eerste danken we onze promotoren, ir. Geert Vandensande, ing. Jan Elsen en ing. Bart Salmon voor de begeleiding die zij ons gegeven hebben.

Diraä Rachid & Swerts Gaëtan

Daarnaast wil ik ook nog mijn familie bedanken omdat zij me de kans heeft gegeven de opleiding tot industrieel ingenieur te volgen. Ik kon steeds op hun steun en begrip rekenen.

Diraä Rachid

Ik heb mij in dit eindwerk mogen concentreren op dingen die mij qua persoon minder sterk liggen. Elke denkstap op papier zetten en vormgeven tot een samenhangend geheel was een aardige uitdaging. Ik wil dan ook graag Rachid bedanken voor zijn bijdrage hierin. Verder bedank ik ook mijn familie, ouders en vrienden voor hun uitgebreide steun.

Swerts Gaëtan

augustus 2014

Inhoudsopgave

Abstract	19
Abstract in English	21
Inleiding	23
1 Literatuurstudie	19
1.1 Introductie Situering DSM	19
1.1.1 Wie zijn de spelers in de elektriciteitssector?	19
1.2 Werking elektriciteitsnet	20
1.2.1 Evenwicht gegarandeerd door reserves	20
Primaire reserve	21
Secundaire reserve	21
Tertiaire reserve	21
1.2.2 DSM als alternatief voor of als bijkomende reserves	22
Potentieel van DSM	22
1.3 Demand side management	23
1.3.1 Wat is DSM	23
1.3.2 Concepten van DSM	23
DR op basis van incentives:	24
DR op basis van periodieke tarifiering	24
DR ingedeeld naar invloed	24
DR alternatieve indeling	25
1.3.3 Systemen voor DR	25
Verbruikers centraal aansturen DLC	25
Automated Demand Response ADR	26
Distributed Spinning Reserve (DSR)	27
Demand Shedding - Shifting - Shaping	28
Virtual Power Plants (VPP)	28
1.3.4 Standaarden, normen en regelgeving	29
De rol van Europa	29
Europees standaardisatie voor smartmetering Europa: M441	29
Europees standaardisatie voor het smartgrid mandaat M490	30
Open Automated Demand Response (OpenADR)	31

1.4	DSM communicatie	33
1.4.1	Power Line Communicatie (PLC)	33
1.4.2	Zigbee	34
1.4.3	KNX	35
1.4.4	EEBus	36
1.5	In de praktijk	37
1.5.1	Miele@Home	38
1.5.2	SMA Smart Home	39
	Sunny Home Manager	39
	Flexible Storage System	40
1.5.3	Plugwise	41
1.5.4	Fifthplay	43
1.5.5	Energy@Home	45
	JEMMA-Java Energy ManageMent Application framework.	48
1.6	DSM projecten	49
1.6.1	Smart Grids Model Region Salzburg (SGMS)	49
	Consumer to Grid (C2G) - Feedback over energieverbruik	49
	Persuasive End-User Energy Management (PEEM)	50
1.6.2	EcoGrid	51
	Opzet	52
	Belangrijke bevindingen	53
	Conclusies	54
1.6.3	PowerMatcher	54
	Werkingsprincipe	55
	Opzet	57
	Conclusie	58
1.6.4	Linear	58
	Doel van het project	58
	Opzet AD infrastructuur	60
	Voorlopige conclusies	61
1.7	Conclusies literatuurstudie	62
2	Theorie	65
2.1	Inleiding	65
2.2	Transformaties	65
2.2.1	Inleiding [20]	65
2.2.2	Clarke-transformatie	67
	Doel	67
	Principe	67
2.2.3	Inverse Clarke-transformatie	68
2.2.4	Park-transformatie	69
	Inleiding	69

Doel	70
Principe	70
2.2.5 Inverse Park-transformatie	70
2.2.6 Space Vector Modulation [20][22]	71
2.3 Energiesturing	73
2.3.1 Inleiding	73
2.3.2 Actief en reactief vermogen	74
2.3.3 Regeling over de spoel	76
2.4 Slotwoord	77
3 TVM-Proefopstelling	79
3.1 Inleiding	79
3.2 Onderdelen & componenten	79
3.2.1 Systeem overzicht [24]	80
Real-time Target of RTT	80
Powermodules	80
Digitale & analoge metingen	80
Engineering pc	81
Software	81
3.3 Opstelling	81
3.3.1 Inleiding	81
3.3.2 Origineel concept	83
3.3.3 Wijziging origineel concept	83
3.4 Alternatieve oplossing met motor/generator koppeling	84
3.4.1 Inleiding	84
3.4.2 Werking regelschema	84
U/f regeling	85
Field Oriented Control	86
De regeling	87
Conclusie regeling	87
3.4.3 Slip	88
3.4.4 Variabel toerental	88
3.4.5 Magnetische verzadiging	89
3.4.6 IGBT's en duty cycle	89
3.5 Besluit	90
4 Metingen en resultaten	91
4.1 Inleiding	91
4.2 Meetopstelling	92
4.3 Metingen	94
4.3.1 Vast toerental 3200rpm	94
4.3.2 Vast toerental 3050 en 3100rpm	98

4.3.3	Lineariteit bepalen a.d.h.v. 3050-3100rpm	112
4.3.4	Implementatie lineariteit	117
4.3.5	Resultaat	126
	Samengestelde spanning en hoek ϕ	127
4.4	Vermogen uit het net	130
4.4.1	Inleiding	130
4.4.2	Vermogens in en uit	130
5	Conclusies proefopstelling	135
A	Elektrisch schema	A1
B	Het model	B1
B.1	AC control	B2
B.1.1	Preprocessing	B3
B.1.2	Control	B4
	Space Vector Modulation	B5
	Stroomrimpel	B5
	FeedForward1	B5
B.2	Motor control	B6
B.2.1	Rotating current control	B7
	<i>3to2_meas</i>	B8
	Park-transformatie	B9
	Offset correction	B10
	PI Current	B10
	Park Inverse	B11
	PWM calculator	B12
	Space Vector Modulation	B12
B.2.2	3ph AC Induction motor Inv 1 - Hardware	B13
B.2.3	Simulatiemodus	B14
B.3	Parameterlijst	B15
C	Installatie Triphase toolbox	C3

Lijst van tabellen

2.1	Schakeltabel en α / β -transformatie van de toestanden[20]	72
4.1	Linearisatie punten i.f.v. ingestelde stroom	114
B.1	Control ingangstabel	B5
B.2	Control uitgangstabel	B5
B.3	Ingangstabel PI Current	B11

Lijst van figuren

1.1	ELIA Dayahead forecast	21
1.2	DSM-vormen	24
1.3	Prioriteitsniveaus in functie van gewenst verbruik	26
1.4	OpenADR - DRAS	27
1.5	OpenADR2.0	32
1.6	PLC toolbox	34
1.7	Zigbee netwerk	34
1.8	KNX communicatie	36
1.9	EEBus interfaces	37
1.10	EEBus mappings	37
1.11	Miele@home	38
1.12	Apparaatstatus, gebruiker behoudt Start/Stop controle	38
1.13	Overzicht tarieven	39
1.14	SMA Home Manager	40
1.15	SMA opslag	40
1.16	SMA batterijen	41
1.17	Overzicht van het Plugwise systeem	41
1.18	Plugwise assortiment	43
1.19	Fifthplay overzicht van producten en diensten	43
1.20	Fifthplay Plug, DIN-Rail en thermostaat	45
1.21	Energy@Home architecture	46
1.22	Energy@Home aanpassingen	47
1.23	Energy@Home uitbreiding functionaliteit	47
1.24	Energy@Home JEMMA architectuur	48
1.25	Energy@Home JEMMA GUI	48
1.26	Enkele voorbeelden van feedback aan de consument over hun energieverbruik	49
1.27	Wattson display	50
1.28	FORE-Watch feedback	51
1.29	EcoGrid markt	52
1.30	Deelnemers	53
1.31	EcoGrid respons	53
1.32	Prijsbepaling bij PowerMatcher	55
1.33	Powermatcher agents	57

1.34	Linear businesscases en controlestrategieën	59
1.35	Linear DSM infrastructuur	61
2.1	Blokschema Clarke- en Park-transformatie[25]	66
2.2	Assenstelsels[26]	66
2.3	Driefase machine met geïsoleerd nulpunt[20]	67
2.4	Clarke-transformatie[26]	68
2.5	Inverse Clarke-transformatie[26]	69
2.6	Park-transformatie[26]	69
2.7	Inverse Park-transformatie[26]	70
2.8	Principe van space vector tijdsberekening [22]	72
2.9	Voorbeeld van duty-cycle generation[20]	72
2.10	Zeshoek, gevormd door basis spacevectoren en sector definiëring (S1-S6) . . .	73
2.11	Vereenvoudigd schema TVM	74
2.12	Vermogen sturen tussen twee bronnen [27]	74
2.13	Fasediagram met actief vermogen opgenomen door bron B [27]	75
2.14	Actief (P) en reactief (Q) vermogen tussen twee bronnen [27]	76
2.15	Aanpassen van de hoek δ met spanningsregeling over de spoel	77
3.1	Functies RTT	80
3.2	Mogelijkheden opladen DC-bus	82
3.3	Overzichtsschema werkingsprincipe met twee TVM's	83
3.4	Motor-generator koppeling	84
3.5	Originele regelkring met stroomsturing	85
3.6	Vereenvoudigde regelkring met stroomsturing	85
3.7	Basis snelheidsregelschema voor ac-motorsturingen [20]	87
3.8	Koppeldoerentalkarakteristiek bij verschillende spanningen	89
4.1	Motor-generator koppeling	91
4.2	Kenplaten, links motor rechts generator	92
4.3	Meetopstelling	92
4.4	Stroomverloop B6-brug inverter2	94
4.5	Staprespons Ud 0 naar 1A	95
4.6	Staprespons Ud 13 naar 14A	95
4.7	Staprespons Uq 0 naar 1A	96
4.8	Staprespons Uq 13 naar 14A	96
4.9	Stroom door inverter1 en inverter2	97
4.10	Meetopstelling	98
4.11	Id stroomprofiel	99
4.12	Spanningsmeting met kunstmatig sterpunt	99
4.13	Invertervermogen 0-14A stap 1A 3050rpm	100
4.14	Invertervermogen 0-14A stap 1A 3100rpm	100
4.15	Inverterspanning 0-14A stap 1A 3050rpm	101

4.16	Inverterspanning 0-14A stap 1A 3100rpm	101
4.17	Inverterfrequentie 0-14A stap 1A 3050rpm	102
4.18	Inverterfrequentie 0-14A stap 1A 3100rpm	102
4.19	PWM signaal 10 A	103
4.20	PWM signaal 11 A	103
4.21	PWM signaal 12 A	104
4.22	Invertervermogen 0-14A stap 14A 3050rpm	105
4.23	Invertervermogen 0-14A stap 14A 3100rpm	105
4.24	Inverterspanning 0-14A stap 14A 3050rpm	106
4.25	Inverterspanning 0-14A stap 14A 3100rpm	106
4.26	Inverterfrequentie 0-14A stap 14A 3050rpm	107
4.27	Inverterfrequentie 0-14A stap 14A 3100rpm	107
4.28	Staprespons U_d 0-1A 3050rpm	108
4.29	Staprespons U_d 0-1A 3100rpm	108
4.30	Staprespons U_q 0-1A 3050rpm	110
4.31	Staprespons U_q 0-1A 3100rpm	110
4.32	Staprespons U_d 0-14A 3050rpm	111
4.33	Staprespons U_d 0-14A 3100rpm	111
4.34	Staprespons U_q 0-14A 3050rpm	112
4.35	Staprespons U_q 0-14A 3100rpm	112
4.36	Linearisatie 1A U_d en U_q	113
4.37	Linearisatie 2A U_d en U_q	115
4.38	Linearisatie 5A U_d en U_q	115
4.39	Linearisatie 10A U_d en U_q	116
4.40	Linearisatie 14A U_d en U_q	116
4.41	Implementatie lineair verband	117
4.42	Invertervermogen 0-14A Stap 1A 3200 rpm	118
4.43	Invertervermogen 0-14A Stap 1A Var. rpm	118
4.44	Inverterspanning 0-14A Stap 1A 3200 rpm	119
4.45	Inverterspanning 0-14A Stap 1A Var. rpm	119
4.46	Inverterfrequentie 0-14A Stap 1A 3200 rpm	120
4.47	Inverterspanning 0-14A Stap 1A Var. rpm	120
4.48	Staprespons U_d 0-1A 3200 rpm	121
4.49	Staprespons U_d 0-1A Var. rpm	121
4.50	Staprespons U_q 0-1A 3200 rpm	122
4.51	Staprespons U_q 0-1A Var. rpm	122
4.52	Staprespons U_d 14A 3050 rpm	124
4.53	Staprespons U_d 14A Var. rpm	124
4.54	Staprespons U_q 14A 3050 rpm	125
4.55	Staprespons U_q 14A Var. rpm	125
4.56	Vermogen Stap 0-14A 3050 rpm	126
4.57	Vermogen Stap 0-14A Var. rpm	126

4.58	Linearisatie 1A	127
4.59	Linearisatie 2A	128
4.60	Linearisatie 5A	128
4.61	Linearisatie 10A	129
4.62	Linearisatie 14A	129
4.63	Vermogens P,Q en S Inverter 2	132
4.64	Vermogens P,Q en S Inverter 1	132
4.65	Faseverschuiving phi inverter 2	133
4.66	Faseverschuiving phi inverter 1	133
4.67	Rendement inverter2	134
4.68	Verhouding P/S inverter 1	134
B.1	Model versie	B1
B.2	Volledig MATLAB Simulink model: PM15F30M30C	B2
B.3	AC control	B3
B.4	Preprocessing blok met scopes	B4
B.5	Control overzicht	B4
B.6	SVM met berekening stroomrimpel	B6
B.7	Feedforward	B6
B.8	Motor Control	B7
B.9	Rotating current control deel1	B8
B.10	Rotating current control deel2	B8
B.11	Clarke-transformatie	B9
B.12	Park-transformatie	B9
B.13	Offset correctie	B10
B.14	PI Current	B11
B.15	Inverse Park-transformatie	B12
B.16	PWM Calculator	B12
B.17	Space Vector Modulation	B13
B.18	Driefase hardwareconnectieblok inverter1	B13
B.19	Ingangstabel hardware inverter1	B13
B.20	Uitgangstabel hardware inverter1	B14
B.21	Simulatiemodus 1	B14
B.22	Simulatiemodus 2	B15

Verklarende woordenlijst

afkorting	uitleg
ADR	Automated Demand Response
AMS	Advanced Metering System
ARP	Access Responsible Party
BRP	Balance Responsible Party
C2G	Consumer to Grid
CEM	Customer Energy Manager
DLC	Direct Load Control
DNB	Distributienetbeheerders
DR	Demand Response
DRAS	Demand Response Automation Server
DSM	Demand Side Management
DSMR	Dutch Smart Meter Requirements
DSR	Distributed Spinning Reserve
EE	Energie-efficiëntie
ESO	Europese Standaardisatie Organisaties
ETS	Engineering Tool Software
EV	Elektrische Voertuigen

FORE	Forecast Of Renewable Energy
FCR	Frequency Containment Reserves
FRR	Frequency Restoration Reserves
GPRS	General Packet Radio Service
HAM	Home Area Manager
HE	Hernieuwbare Energie
HEB	Hernieuwbare Energiebronnen
HMI	Human Machine Interface
IRON	Integral Resource Optimization Network
PEEM	Persuasive End-User Energy Management
PI	Proportioneel Integrerend
PL	Power Line
PLC	Power Line Communication
PWM	Pulse Width Modulation
RF	Radio Frequency
RR	Replacements Reserves
RTP	Real Time Pricing
RTT	Real Time Target
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SGMS	Smart Grids Model Region Salzburg
SR	Spinning Reserves
SVM	Space Vector Modulation
TNB	Transmissienetbeheerder

ToU	Time Of Use
TVM	Triphase Vermogen Module
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informations- technik
VEN	Virtual End Nodes
VPP	Virtual Powerplant
VSI	Voltage Source Inverter
VTN	Virtual Top Nodes
XML	Extensible Markup Language

Abstract

i-NET doet onderzoek naar elektrische energie, smart- en microgrids, powerquality en decentraal energiebeheer. Nieuwe technologieën voor het genereren van hernieuwbare energie en het toenemend verbruik maken het vinden van evenwicht op het elektriciteitsnet almaar moeilijker. De tot nog toe gebruikte technieken, die voornamelijk productie regelen, zullen in de toekomst niet meer volstaan.

Deze masterproef onderzoekt residentieel *demand side management*, dat de energievraag van apparaten zo veel mogelijk afstemt op de actuele elektriciteitsproductie. Dit gebeurt door het energieverbruik zorgvuldig in te plannen en zo een bijdrage te leveren aan het evenwicht tussen totale productie en verbruik.

Een eerste luik is een literatuurstudie om de kennis over demand side management te verdiepen en de stand van de technologie te kennen. Hieruit blijkt de technologie nog niet klaar om op grote schaal te worden uitgerold. Er wordt gezocht naar methodes om de technologie vlotter inzetbaar te maken.

Een tweede deel omvat de bouw van een proefopstelling om onderzoek naar demand side management binnen i-NET te ondersteunen. Hiermee kan het energieverbruik van een modelwoning uit het elektriciteitsnet worden onttrokken.

Met de gerealiseerde opstelling kan later de invloed van verschillende vormen demand side management (o.a. periodieke tarifiering, prijssignalen, marktprogramma's,...) op een energieprofiel van een woning of wijk worden onderzocht.

Abstract in English

The i-NET research group investigates electric power, smart and microgrids, powerquality, and decentralized energy management.

New technologies for generating renewable energy and increasing consumption make it difficult to balance the powergrid. Techniques used so far, mostly regulate production but will not satisfy demands for the future.

Residential *demand side management* attempts to match the current energy demand to the actual current electricity production. By planning energy consumption, these techniques can contribute to balance the grid and find an equilibrium between production and consumption

A literature review was done to investigate the current state of demand side management technologies, also expanding our understanding on this matter. This led to the conclusion that the technology is currently not ready to be applied on a wider scale. Research is exploring ways to make technology easier to deploy on a larger scale.

To support further research on demand side management within i-NET, a testing unit was built to withdraw the actual energydemand of a model household from the local electricity net.

With the new testing unit, the influence of different types of demand side management on an energyprofile of a home or neighbourhood can be examined in the future.

Inleiding

Deze masterproef onderzoekt de huidige stand van zaken en mogelijkheden omtrent residentieel Demand Side Management(DSM).

DSM is een techniek waarbij de vraag naar elektriciteit van verbruikers zo veel mogelijk wordt afgestemd op de actuele elektriciteitsproductie. DSM is geen totaaloplossing maar streeft naar het zo optimaal mogelijk gebruik van het net.

Een eerste luik is een literatuur- en marktstudie over DSM. Welke methodes en technieken kunnen of worden al gebruikt om residentieel verbruik intelligent af te stemmen op lokale hernieuwbare energie (HE) productie en dit zonder comfortverlies voor de gebruiker. Wat is er nodig aan technologie, hardware en infrastructuur om aan DSM te doen en welke zijn vereisten om deze systemen goed te laten functioneren? Welke verschillende types van systemen bestaan er en wat zijn hun voor- en nadelen?

In het tweede deel wordt de realisatie beschreven van een proefopstelling die deel zal uitmaken van de DSM-testinfrastructuur bij i-NET. Dit deel start met hoofdstuk 2 waarin een theoretische uiteenzetting wordt gegeven van gebruikte technieken. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de gebruikte apparatuur en werkwijze. Tot slot staan in dit hoofdstuk ook de problemen die we tegenkwamen en de gevonden toegepaste of mogelijke oplossingen hiervoor.

Hoofdstuk 4 beschrijft de wijze waarop vermogensprofielen in real time of versneld zijn geëmuleerd, de resultaten en geeft een evaluatie van de testopstelling.

Tot slot volgen onze conclusies in hoofdstuk 5 en geven we een overzicht van mogelijke stappen voor verdere optimalisatie van de opstelling.

Toegevoegd vindt u nog enkele bijlages waaronder het elektrische schema, het gebruikte Matlab model.

Hoofdstuk 1

Literatuurstudie

Deze literatuurstudie schetst een overzicht van de werking van het elektriciteitsnet en de hoofdrolspelers hierin. Daarna volgt een uiteenzetting over demand side management (DSM), de bestaande concepten en de veranderende dynamiek van het net, om zo te komen tot nieuwe evoluties en trends om deze veranderingen op te vangen.

1.1 Introductie Situering DSM

De volgende paragrafen geven weer in welk kader DSM zich situeert, wie de belanghebbenden zijn en welke rol ze (kunnen) spelen. Dan volgt een korte schets over de werking en dynamiek van het elektriciteitsnet om zo over te gaan naar de werkelijke focus, namelijk DSM.

1.1.1 Wie zijn de spelers in de elektriciteitssector?

Producenten bezitten centrales of productie-eenheden van verschillende types: kerncentrales, thermische centrales (op gas, steenkool of biomassa), windmolens, zonne-installaties, waterkrachtcentrales, enz...

De beheerder van het hoogspanningstransmissienet of TNB, transporteert de opgewekte elektriciteit van productiecentrales naar distributienetbeheerders en industriële klanten (grootverbruikers voornamelijk uit de chemische nijverheid en de staalsector). Deze grootverbruikers zijn vaak rechtstreeks op het hoogspanningsnet aangesloten. Verder ontwikkelt de beheerder ook interconnecties of „elektriciteitssnelwegen” met de buurlanden, om import en export van elektriciteit mogelijk te maken. De beheerder produceert dus zelf geen elektriciteit.

De distributiebeheerders (DNB) leveren elektriciteit, maar nu op midden- en laagspanning, naar KMO's en particulieren via hun eigen distributienetten.

De elektriciteitsleverancier verkoopt de elektriciteit aan zijn klanten, zowel bedrijven als particulieren. Hij sluit met zijn klanten een contract af dat hem er toe bindt hen voldoende en continu van elektriciteit te voorzien. Hiervoor zal hij de nodige elektriciteit bij

een -al dan niet Belgische- producent kopen of indien nodig op de energiebeurs.

De consument heeft momenteel, met zijn zonnepanelen en in de toekomst met zijn slimme meter, elektrische wagen, ..., almaar meer invloed op het verbruik en de productie van energie. Hierdoor wordt hij een steeds belangrijkere speler op het elektrische net.

1.2 Werking elektriciteitsnet

In het huidige energienet wordt alle opgewekte energie meteen ook verbruikt. Op dit moment bestaat er nog geen efficiënte/economisch rendabele manier om grote hoeveelheden energie op te slaan.

Dit impliceert dat het aanbod van energie (zowel productie als import) op elk moment gelijk moet zijn aan de vraag (afname en export) naar energie. Als deze twee niet in evenwicht zijn zal de netfrequentie licht stijgen of dalen, meestal slechts enkele honderdsten Hertz, in extreme gevallen tot enkele tienden[1]. Het onevenwicht vraagt om een actie of het zoeken naar een nieuw evenwicht tussen vraag en aanbod.

Om dit nieuw evenwicht te bereiken heeft de netbeheerder een aantal maatregelen [2] die kunnen worden genomen zodat er geen of zelden blackouts optreden. Deze maatregelen zijn driedelig:

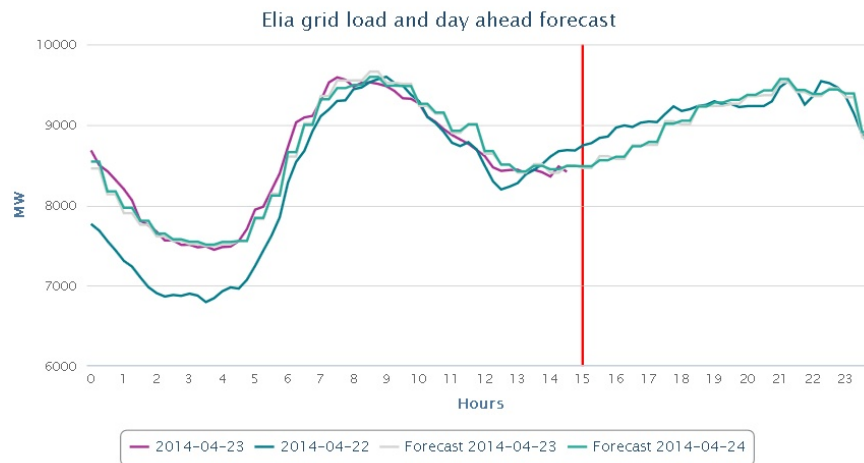
Een eerste pijler is een Europese samenwerking aangezien het Belgische net deel uitmaakt van het grote Europese elektriciteitsnet van 24 verbonden landen. Bij grote onevenwichten kan elk verbonden land rekenen op hulp uit andere verbonden landen. Deze hulp is beperkt in de tijd en strikt gebonden door Europese regels. Bijkomend heeft de TNB ook contracten met naburige netbeheerders om in specifieke gevallen ondersteuning te krijgen of bieden.

Een tweede pijler is de evenwichtsverantwoordelijkheid. Elk toegangspunt, zowel productie als verbruik, van het elektriciteitsnet valt onder de verantwoordelijkheid van een Access Responsible Party (ARP) of ook wel Balance Responsible Party (BRP) genoemd. Deze moet zorgen dat het totaal van verbruik en productie in zijn klantenportefeuille op kwartuurbasis op elkaar zijn afgestemd. Stelt de netbeheerder toch een onevenwicht vast tussen de totale productie, import of aankopen enerzijds, en het totale verbruik, export en verkopen anderzijds, dan wordt een onevenwichtstarief aangerekend.

Een derde en laatste pijler is de steun van netgebruikers. Indien de BRP's er niet in slagen om hun klantenportefeuille in evenwicht te houden, dient Elia zelf de nodige initiatieven te nemen om het evenwicht van de regelzone te herstellen. Aangezien de netbeheerder zelf geen productie-eenheden bezit, zal het de netgebruikers, zowel producenten als consumenten, vragen een aantal ondersteunende diensten te leveren onder de vorm van reserves.

1.2.1 Evenwicht gegarandeerd door reserves

Zoals eerder aangehaald spelen deze BRP's een belangrijke rol bij het bewaren van dit evenwicht. BRP's proberen de verwachte vraag en het verwachte aanbod op elkaar af te stemmen, en slagen daar tamelijk precies in, hoewel er altijd enkele procenten onbalans



Figuur 1.1: ELIA Dayahead forecast

blijven bestaan, de residuele onbalans. Op figuur 1.1 kan je merken dat het verschil tussen day-ahead en actueel verbruik kan verschillen tot 1000MW of 10%. De inter-day imbalance is veel lager maar geeft toch nog aanleiding tot belangrijke onbalans. Om dit residuele onevenwicht weg te werken beschikt de transmissienetbeheerder (TNB), Elia voor ons land, over reservecapaciteit. Deze reservecapaciteit kan worden opgedeeld in 3 types, primair, secundair en tertiair, naargelang het doel.

Primaire reserve

Een eerste type is Frequency Containment Reserves (FCR), met als doel de frequentie te stabiliseren binnen bepaalde grenzen bij incidenten[3]. Deze kunnen binnen de 10 tot 30 seconden volledig actief zijn. Concreet gaat het, voor België, 100MW, voor continentaal Europa over 3GW, die kan geleverd worden tot 15 minuten na het incident[4].

Secundaire reserve

Een tweede type is de Frequency Restoration Reserve (FRR). Dit zijn operationele reserves die de netfrequentie terug op nominale waarde moeten herstellen en hebben eveneens als doel om zo snel mogelijk de primaire reserve terug beschikbaar te maken voor andere incidenten. Deze reserves kunnen worden geactiveerd in enkele seconden tot, typisch, 15 minuten.

Tertiaire reserve

Een laatste type reservecapaciteit zijn de Replacements Reserves (RR). Deze worden aangewend om na een incident primaire en secundaire reserves terug beschikbaar te maken om nieuwe onevenwichten op te vangen. In tegenstelling tot de primaire en secundaire reserves worden ze manueel op vraag van de netbeheerder geactiveerd.

1.2.2 DSM als alternatief voor of als bijkomende reserves

Het hoeft geen betoog dat het aanhouden van deze reserves een aanzienlijke economische kost met zich meebrengt. Een kost die wordt doorgerekend aan de bron van het onevenwicht, een BRP die een slechte voorspelling van zijn benodigde verbruik doorgeeft aan zijn TNB of een producent die een deel van zijn geplande productie plots ziet wegvallen door een storing of defect.

Door de evolutie in de rol van de consument, van pure verbruiker naar producent/consumment, zal het verbruik en productie almaar dynamischer worden. Het elektriciteitsnet, op zijn verschillende niveaus, zal met deze dynamiek om moeten kunnen. Eén van de middelen waarnaar de sector kijkt is DSM, dat beoogt met kleine aanpassingen in ons gedrag enerzijds het verbruik te verminderen. Anderzijds wil men via DSM een deel van het dynamisch evenwicht beheren door de vraag naar elektriciteit, bij een tijdelijke beperkte energieproductie, terug te schroeven.

Een bijkomend drijfveer voor de intrede van DSM is de Europese 2020-klimaatdoelstelling die het aandeel hernieuwbare energie in het bruto-eindverbruik wilt vergroten tot 20% tegen 2020[7]. In de volgende paragraaf is deze bijkomende motivatie verder toegelicht.

Potentieel van DSM

Het evenwicht in het net is uiterst belangrijk voor de goede werking ervan. Tot nog toe werd het evenwicht voornamelijk verzorgd door in te grijpen aan de productiezijde. Deze werkwijze blijkt almaar minder efficiënt[1], door de toename van de verschillende vormen van HEB, met hun zeer wisselend karakter. In de toekomst zal het beheer van dit evenwicht ook de uitdaging van elektrische voertuigen het hoofd moeten bieden.

Vandaar dat er volop wordt ingezet op DSM. Het ontwikkelen van DSM-systemen wordt voorts gedreven door de uitbreidende elektrificatie van het leven. Hierdoor stijgt, ondanks toenemende energie-efficiëntie, het verbruik jaar na jaar. En experts zijn het over eens dat productie niet zozeer een probleem zal vormen maar eerder de beperkingen van het net. En net op dat vlak kan DSM een rol van betekenis spelen. Het feit dat de kosten voor communicatietechnologie steeds kleiner worden draagt ook bij tot deze dynamiek.

Verscheidende studies tonen heel wat potentieel voor het gebruik van DSM.

Het Europese Mirabel Project [5] heeft onderzocht in welke mate de elektriciteitsvraag en -generatie flexibel kan worden ingezet om het onregelmatig karakter van HEB op te vangen. Door bijvoorbeeld elektriciteitsvraag uit te stellen tot op het moment dat er energie van een HEB beschikbaar is. Uit hun simulatiemodellen en testen verwachten ze een efficiëntere productie en consumptie cyclus met een afvlakking van de vraagpiek rond de 8 á 9 %).

Een studie van Duitse Verband der Elektrotechnik (VDE) toont aan dat het theoretisch potentieel voor residentieel DSM in Duitsland tot 35GW zal toenemen tegen 2030 [6]. De toename komt de eerste jaren voornamelijk op rekening van het stijgend aantal warmtepompen en airconditioningssystemen, die laatste bieden vooral in de zomer mogelijkheden voor DSM. Daarnaast zal op langere termijn ook de doorbraak van de elektrisch auto een wezenlijke rol spelen.

Als kanttekening hierbij, dient te worden aangehaald dat om dit theoretische potentieel volledig te benutten de klant zal moeten inboeten op comfort en m.a.w. dus nooit ten volle kan worden geëxploiteerd. Ook zal de alsmare toenemende energie-efficiëntie van apparaten dit DSM potentieel enigszins negatief beïnvloeden.

1.3 Demand side management

Zoals eerder vermeld is het beheer van de vraagzijde een veelbelovende piste in het bewaren van evenwicht en de limieten van het net op te rekken. Het gebruik van lasten als bijkomend regelsysteem is zeker geen nieuw gegeven.

Al in de late jaren '70, mede door de oliecrisis, werden de eerste stappen in het gebruik van DSM gezet in de Verenigde Staten[11]. De hernieuwde interesse voor DSM is deels ook te verklaren door de almare dalende kost van communicatietechnologie en elektronisch componenten. Grootste voordeel van DSM blijft natuurlijk dat het altijd goedkoper zal zijn lasten intelligent te sturen dan een nieuwe centrale te bouwen of elektrische opslag te voorzien.

De volgende paragrafen schetsen in vogelvlucht de verschillende vormen van DSM en hun basisprincipes.

1.3.1 Wat is DSM

DSM in zijn ruimste zin omvat alle handelingen aan de vraagzijde van het energiesysteem. In zijn simpelste vorm ingrepen zoals gloeilampen vervangen door spaarlampen of leds, tot zeer complexe ingrepen zoals een ingewikkelde en dynamische vraagsturing installeren.

In het verleden was DSM eerder „utility driven”, enkel lasten werden beschouwd, maar in de nabije toekomst verschuift de focus naar meer „customer driven” DSM met het oog op de consumenten, die zijn verbruikers in alle comfort kan blijven gebruiken.

1.3.2 Concepten van DSM

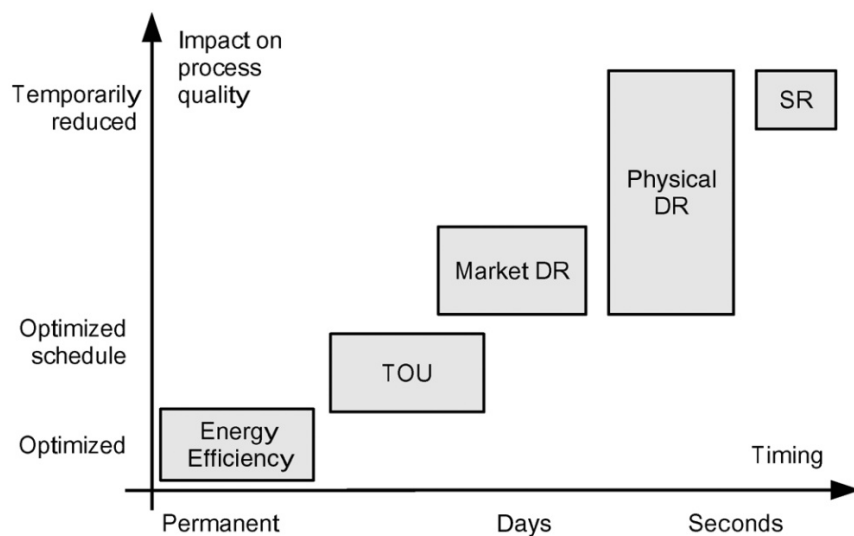
DSM wordt in figuur 1.2 op basis van de timing en invloed van de maatregelen opgedeeld in categorieën :

Energie-efficiëntie (EE) Permanente aanpassing van uitrusting of eigenschappen.

Time of Use (TOU) Verbruik tijdens piekperiode bestraffen met hogere prijs.

Demand Response (DR) Beïnvloeden van verbruiksprofielen met evt. minder verbruik.

Spinning Reserve (SR) Lasten verbruiken minder bij dalende netfrequentie.



Figuur 1.2: Verschillende vormen van DSM [12]

[Noot: Naarmate de reactiesnelheid groter wordt neemt ook de mogelijke ongewenste invloed voor de gebruiker toe.]

Als we enkel dynamische DSM of Demand Response (DR) beschouwen, wordt DR op verschillende manieren ingedeeld al naargelang de bron. Een indeling kan als volgt[13] :

DR op basis van incentives:

- Direct load control(DLC): Netbeheerder/toestel beschikt vrij over verbruiker/proces.
- Onderbreekbare service/verminderd tarief: Consument heeft specifiek contract.
- Demand Response NoodProgramma: Vrijwillige respons op noodsignalen.
- Markt programma's: Consument verbindt zich tot actie bij problemen.
- Demand Biedprogramma's: Klant biedt flexibiliteit in ruil voor scherpere prijzen.

DR op basis van periodieke tarifiering

- Time-of-use tarieven: Toepassen van een vast prijsplan (bvb. dag/nacht).
- Critical peak pricing: TOU met kortere horizon.
- Real-time pricing (RTP): Communiceren van groothandelsprijs naar eindgebruiker.

DR ingedeeld naar invloed

- Level I: Invloed op lastprofiel
- Level II: Invloed op eindgebruik, alternatieve technologie en marktwerking.

DR alternatieve indeling

- Markt DR: real-time pricing, prijssignalen en incentives.
- Fysische DR: grid management en noodsignalen.

Deze masterproef handelt over DSM op woning en wijkniveau en behandelt voorts enkel de aspecten met betrekking tot dynamische DSM en DR, voor de overigen is [12] een zeer informatieve bron.

1.3.3 Systemen voor DR

Wat volgt is een overzicht van verschillende technische, commerciële als fysische principes waarop DR steunt, afhankelijk van de omstandigheden.

Verbruikers centraal aansturen DLC

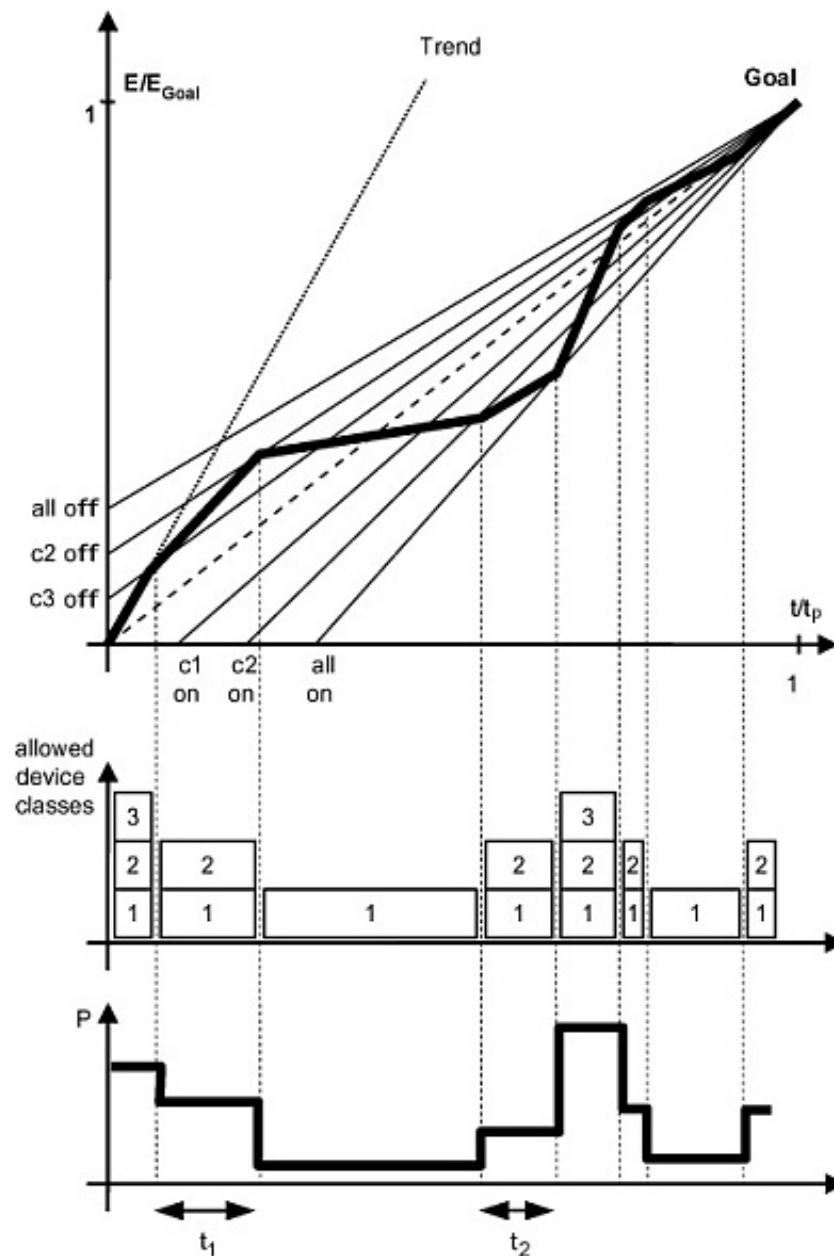
Een eerste aspect bij DSM is het aansturen van lasten of verbruikers. Hiervoor worden apparaten of controllers gebruikt die meestal te vinden zijn in de buurt van de elektriciteitsmeter. Op basis van energieverbruik kan de controller verbruikers uitschakelen afhankelijk van ingestelde prioriteiten en regels.

Dit lijkt simpel maar in de praktijk blijkt dit zeer complex, zeker als men gebruikers toevoegt of verwijdert en de stabiliteit hangt erg af van kwaliteit van de ingestelde regels. Volgend simpel voorbeeld illustreert de werkwijze:

Figuur 1.3 [12] toont één verbruiksperiode, dit is de kortstmogelijke facturatieperiode, meestal 15 of 30 minuten. Elke periode start het verbruik vanaf nul en loopt gestaag op.

Als het verbruikstraject een drempelwaarde overschrijdt, schakelen bepaalde groepen van verbruikers uit (in dit voorbeeld zijn er 3 groepen, c1 de belangrijkste c3 de minst belangrijke). Indien het verbruik onvoldoende daalt schakelt groep c2 uit, daalt het te sterk schakelt c1 terug in. In het ergste geval kunnen alle groepen uitschakelen en is er een horizontaal verloop. Uiteindelijk zal op het eind van de periode het doel worden bereikt.

Merk op dat gedurende periode $t1$ en $t2$ het verbruik niet gelijk is hoewel dezelfde groepen mogen verbruiken. Dit duidt erop dat toestellen in éénzelfde categorie mogen verbruiken maar dat niet moeten en dus hun eigen controller en planning kunnen hebben. Ook het doel kan elke periode anders zijn. We gaan er hierbij even gemakshalve vanuit dat het opgegeven verbruiksprofiel ook effectief over het net kan worden getransporteerd, dit is een bijkomende controle die zeker moet gebeuren.



Figuur 1.3: Prioriteitsniveaus in functie van gewenst verbruik

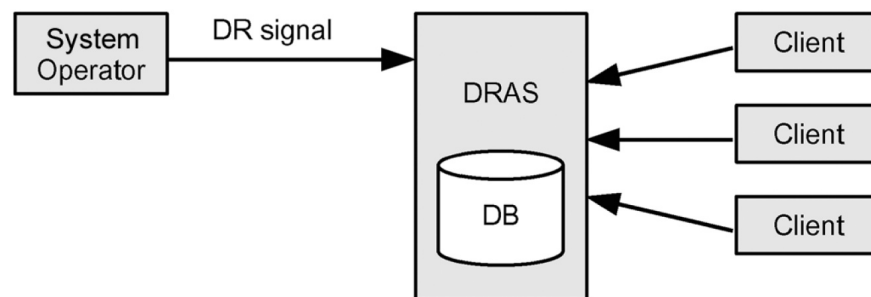
Automated Demand Response ADR

Bij ADR stuurt de DSO/TSO een signaal uit, met prijsinformatie of vraag tot lastverschuiving, naar de gebruikers. Er is niet noodzakelijk directe actie nodig aan de gebruikerszijde, maar kan ook refereren naar een later tijdstip, 12h de volgende dag, aangezien piekmomenten kunnen worden voorspeld. OpenADR is een open specificatie en toepassing van een gedistribueerd, client-server gebaseerd DR-model. De klant abonneert zich op DR-berichten die de DSO/TSO uitstuurt. Figuur 1.4 geeft de hoofdelementen van het systeem weer.

- Demand Response Automation Server (DRAS).
- DRAS Clients bij de consument.
- Het internet als communicatiemiddel.

Aan kantzijde is meestal enkel een communicatiemodule te vinden, die door fabrikanten van apparaatcontrollers OpenADR-compatibel zijn verklaard. Klanten schrijven in op bepaalde DR-programma's (critical peak pricing of demand bidding). De DRAS gedraagt zich als marktplatform en beheert inschrijvingen van verbonden klanten en hun deelname aan specifiek programma's. Als de beheerder een noodsignaal verstuurt naar de DRAS, stuurt de server deze boodschap verder naar alle klanten die ingeschreven zijn in het noodprogramma. Alle transacties moeten ook door de DRAS worden opgenomen aangezien de klanten die reageren beloond worden.

De werking is een soort openlus-regeling aangezien er geen enkele terugkoppeling is over effectief verbruik of lokale toestand van het net. Dit kan opgelost worden door bijkomend lokale metingen te doen en deze stroom- en spanningsinfo beschikbaar te stellen als terugkoppeling [10]. In punt 1.3.4 wordt OpenADR, als prestandaard, meer in detail besproken.



Figuur 1.4: OpenADR-klanten en beheerder communiceren met DRAS

Distributed Spinning Reserve (DSR)

DSR is ongebruikte capaciteit die kan geactiveerd worden door de DSO/TSO. Ze wordt beschikbaar gemaakt door apparaten die zijn gesynchroniseerd met het netwerk en de actieve energie op het net kunnen beïnvloeden.

Aan de vraagzijde betekent dit lasten die verhoogd of verlaagd kunnen worden als de netfrequentie stijgt of daalt. Negatieve spinning reserve is dus capaciteit die snel kan worden afgeschakeld om een dip in de energievraag op te vangen.

Over het algemeen wordt spinning reserve voorzien door grote producenten/consumenten, waar de TSO/DSO de klant is. Ook hier begint men gewone consumenten, al dan niet geaggregeerd, in te schakelen.

Twee implementaties van dit systeem zijn Integral Resource Optimization Network (IRON) [16] en „The grid friendly controller” [17]. Beide systemen meten de frequentie en reageren hierop, waarbij IRON via een extra communicatie interface algoritmes gebruikt om stabiliteit te garanderen, zodat niet alle lasten gelijktijdig reageren. Daarnaast voorzien ze een „fairness” systeem om te vermijden dat de financiële voordelen enkel terecht komen bij de lasten die het snelst reageren.

Demand Shedding - Shifting - Shaping

Dit trio van DR geeft een evolutie weer die DR momenteel doormaakt.

Demand shedding is de simpelste vorm van de drie en houdt in dat de last gedurende piekperiodes wordt uitgeschakeld. Dit heeft verschillende nadelen, het gestopte proces apparaat zal na de piekperiode zijn schade willen/moeten inhalen en kan een rebound of payback-effect veroorzaken.

Daarom is het verschuiven van het lastmoment buiten de piekperiodes, of **demand shifting** een beter alternatief. Dit kan door vooraf een (deel)last te plannen, bvb op voorhand dieper koelen, of een activiteit uit te stellen, de vaatwasser later programmeren. Om dit te bereiken moet het lastprofiel van de gebruiker gekend zijn. Zo kan men voorspellen op welk moment in de cyclus en voor hoelang een last kan worden uitgeschakeld. Bijkomend kan er ook berekend worden of het ook effectief rendeert.

Een laatste, complexere vorm is **demand shaping**, lasten bijna realtime afstemmen op de fluctuaties van HEB. Dit door, in een tijdspanne van 5 minuten, te reageren op signalen op basis van de toestand van het net. Deze laatste vorm vereist gesofistikeerde apparatuur en software en verhoogt zo de instapdrempel.

Virtual Power Plants (VPP)

VPP's zijn de combinatie van een aantal kleinere (hernieuwbare) energiebronnen die voor de netbeheerder als één geheel worden gezien. De typisch geografische verspreide bronnen worden centraal beheerd en via moderne SCADA-standaarden gebundeld.

Als men in plaats van bronnen lasten bundelt, kan er zelfs aan virtuele opslag worden gedaan door energie op te nemen op welgekozen momenten. Op residentieel vlak kan met deze techniek een win-win situatie ontstaan. De meeste huurders staan zelf in voor hun energierekening. Hierdoor is de eigenaar niet geneigd energiebesparende maatregelen te nemen aangezien de voordelen direct naar de huurder stromen.

Er zijn spelers op de markt, zoals Schneider Electric, die deze investeringen willen dragen in ruil voor flexibiliteit van de bewoners. Deze flexibiliteit kunnen zij dan bundelen en aanbieden op de energiemarkt. De eigenaar hoeft niet te investeren en ontvangt zijn deel van de gemaakte winsten, de huurders hebben een betere woning. Het spreekt vanzelf dat deze opzet enkel in grote gebouwen rendabel is.

Het is voor ons duidelijk dat al deze methodes, in al dan niet gewijzigde of gecombineerde vorm in de toekomst de ontluikende markt van DR zeker zal doen groeien. Aan de ene kant zal, naarmate bedrijven inzien dat er met DR geld kan worden verdiend, meer en meer worden geïnvesteerd. Hierbij zal onderzoek, zoals dit bij i-NET gebeurt, zeker bijdragen.

Daarnaast wordt het draagvlak bij de consument alsmaar groter als gevolg van bewustwor-

ding. Deze bewustwording wordt gevoed door zowel sensibilisering enerzijds, als strengere reglementering door overheden anderzijds. Hierdoor zal de consument een klein deel van zijn comfort opgeven in ruil voor milieu en maatschappij.

Tot slot zijn experts het erover eens dat, indien we een zekere en continue electriciteitsvoorziening willen, DR zijn rol zal spelen.

1.3.4 Standaarden, normen en regelgeving

De rol van Europa

Op Europees niveau heeft de New Approach gezorgd voor een succesvolle interactie tussen standaardisatie en wetgeving. Deze nieuwe aanpak houdt in dat, terwijl de wetgevende instanties de vereisten voor producten en diensten bepalen en vastleggen in directieven, die later geïmplementeerd worden in Europese standaarden. Hierbij wordt het formuleren van technische details overgedragen naar technische comités via mandaten.

Via deze werkwijze kan er toch een goede consensus worden gevonden voor de soms tegenstelde belangen van verschillende betrokkenen. Mandaten zijn verklaringen van beleidsintenties waarin de Europese commissie en zijn lidstaten aan de gespecialiseerde Europese Standaardisatie Organisaties (ESO) vragen standaarden te ontwikkelen die overeenstemmen met regelgeving en andere beleidsinitiatieven.

Met betrekking tot Smart Grids worden M441 voor smart metering en M490 voor smart grids hierna kort besproken. Ook andere aspecten, zoals integratie en opladen van elektrische voertuigen, vastgelegd in M468, maken deel uit van Europese regelgeving, maar vallen buiten de scope van deze literatuurstudie. Verder is met de recente ontwikkelingen rond OpenADR een grote stap gezet naar open en gestandaardiseerde communicatie over energiegebruik.

Europees standaardisatie voor smartmetering Europa: M441

Het doel van mandaat 441 is een Europese standaard te voorzien die de interoperabiliteit van slimme meters garandeert (zowel elektriciteits-, gas- als watermeters).

Met de vastgelegde standaard worden middelen aan de consument aangereikt om zich ten volle bewust te worden van zijn effectieve verbruik en hem toestaan dit aan te passen volgens zijn noden.

Als het mandaat uitgevoerd is, zal het zowel volledige geïntegreerde oplossingen als deeloplossingen bieden die daarenboven veilige data-uitwisseling voorzien. Bijkomend moeten deze oplossingen makkelijk schaalbaar zijn en aanpasbaar aan toekomstige communicatiewijzen. M441 gaat over slimme meter *infrastructuur* meer dan enkel over slimme meters.

In uitvoering van dit mandaat 441 hebben verschillende Europese standaardisatie organisaties samengewerkt om een pakket van standaarden samen te stellen en een plan van aanpak opgesteld voor Europese lidstaten om slimme meter programma's uit te rollen. Daarnaast moeten deze standaarden het risico op het ontstaan van lokale technologische eilanden verkleinen en maken ze het mogelijk de markt van de slimme meters voor verscheidene producenten open te stellen.

Het resultaat is zoveel mogelijk gebaseerd op bestaande standaarden met daarnaast de mogelijkheid tot vastleggen van bijkomende standaarden.

Een belangrijk aspect hierin was het vastleggen van zes basisfunctionaliteiten voor een advanced metering system (AMS):

- F1 - Het op afstand uitlezen van meterstanden en doorsturen naar bevoegde instantie;
- F2 - Tweewegcommunicatie tussen slimme meter en bevoegde leverancier/organisatie;
- F3 - Ondersteuning van variabele tarifiering;
- F4 - Mogelijkheid tot uit- en aanschakelen en vermogensregeling op afstand;
- F5 - Beveiligde communicatie om meterdata te tonen en te exporteren voor de eindgebruiker (of een aangewezen dienstverlener) voor analyse;
- F6 - Meetgegevens van de gebruiker rechtstreeks via een communicatiepoort beschikbaar maken voor een scherm of externe apparatuur

Een belangrijke bijkomende functie is het mogelijk maken van communicatie met apparaten of gateways in de woning die instaan voor energie-efficiëntie en demand side management.

Europees standaardisatie voor het smartgrid mandaat M490

Een tweede mandaat is M490. Het doel hiervan is eveneens een set van standaarden vastleggen of ontwikkelen in een gemeenschappelijk Europees kader.

Dit moet de integratie van computer- en communicatietechnologieën en de verschillende elektrische architecturen doorheen Europa mogelijk maken. Ook de verscheidene processen en diensten voorzien, nodig voor interoperabiliteit en het mogelijk maken de verschillende diensten en functionaliteiten, op hoger niveau, zoals gedefinieerd door het Smart Grid Task Force.

Deze zes topniveau diensten, vastgelegd door het Smart Grid Task force zijn:

- Het elektriciteitsnet moet gebruikers met nieuwe noden kunnen integreren;
- Het dagdagelijks netwerkbeheer efficiënter maken;
- Verzekeren van veiligheid, controle en kwaliteit van het netwerk;
- Betere planning van toekomstige investeringen in het netwerk mogelijk maken;
- Marktwerving en klantenservice verbeteren;
- Sterkere en directe betrokkenheid van de consument in zijn eigen energieverbruik en -beheer mogelijk maken en aanmoedigen;

Het resultaat van mandaat 490 kan worden samengevat in drie delen: een eerste stuk zal de aflevering van een technische referentie architectuur zijn, die alle functionele datastromen tussen de verschillende elektrische netwerken kan voorstellen en die systemen en subsysteem architecturen kan integreren.

Een tweede deel is het samenstellen van een aantal standaarden die de nodige informatie-uitwisseling, zowel communicatieprotocollen als datamodellen, ondersteunt en toestaat om alle gebruikers te koppelen aan het elektriciteitsnetwerk.

Tot slot moet mandaat 490 voorzien in duurzame standaardisatie-processen en werkmiddelen om de belanghebbenden de middelen te geven om deze processen te verbeteren en aan te passen aan de nieuwe realiteit. Terwijl moet ook de interoperabiliteit, veiligheid en privacy verzekerd blijven. Dit alles om het distributienet voldoende flexibel te maken om toekomstige ontwikkelingen probleemloos tegemoet te gaan.

Hoewel gebouwen, industrie en home automation vaak raakpunten hebben met het smart grid en zijn diensten, vallen deze buiten de scope van mandaat 490.

Open Automated Demand Response (OpenADR)

De ontwikkelingen in de DR-markt resulteren in de transitie van manuele DR naar Automatische DR-programma's. Het doel van het OpenADR datamodel is te interageren met gebouw en industriële controle systemen die geprogrammeerd zijn actie te ondernemen op basis van een DR-sigitaal, en zo een reactie op een DR-event volledig automatisch te laten verlopen, zonder manuele tussenkomst.

OpenADR is een open en gestandaardiseerde manier voor klanten, leveranciers en netbeheerders om met DR-signalen te communiceren over energiegebruik. Ze maakt het mogelijk een hele waaier van DR-signalen uit te wisselen. Onder meer dynamische prijssignalen, signalen over betrouwbaarheid en noodgevallen, marktdeelname door biedingen, last- en generatievoorspelling.

Het is gebaseerd op open standaarden zoals XML en omvat ook mechanismen om transport en veiligheid te garanderen.

De communicatie verloopt via bestaande, op IP gebaseerde communicatie-netwerken, zoals het internet. Ze werd in het leven geroepen door de OpenADR Alliance[8], die ontwikkelingen, aanpassingen en conformiteit bevordert door samenwerking, training en certificering.

Een eerste versie, OpenADR1.0 is ontwikkeld ter ondersteuning van Auto-DR programma's in California en de beleidsdoelen van de overheid om energie meer dynamisch aan te rekenen om zo de economische en betrouwbare uitbating van het net te verbeteren. Met OpenADR1.0 kan aan de hand van realtime prijsinformatie de automatische sturing continu het prijsniveau monitoren en op basis hiervan automatische controle- en responsstrategieën ontwikkelen, om

zo te komen tot dynamische energieprijzen en vraag en aanbod optimaliseren.

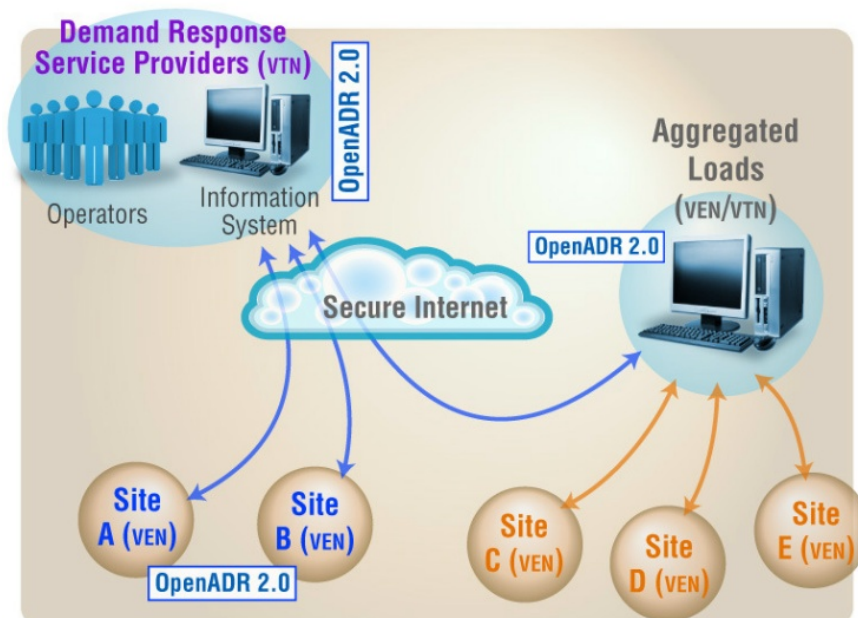
OPENADR2.0 breidt de mogelijkheden verder uit om een antwoord te bieden op de noden van de DR-markt. Zo zijn er bijkomende services (Fast DR), dynamische prijzen, net balancing services (Fast DR), HEB, elektrisch voertuigen(EV), energieopslag.

OpenADR is op dit moment de meest uitgebreide standaard voor vraagsturing en geniet brede steun in de industrie.

Op 25 februari 2014 heeft het International Electrotechnical Commission (IEC), OpenADR 2.0b als Publicly Available Specification (PAS) IEC/PAS 62746-10-1 als basis voor een nieuwe standaard goedgekeurd. Dit versterkt het standaardiseringsproces en organisaties die deze standaard verwelkomen en hierop nieuwe producten ontwikkelen.

OpenADR2.0 gebruikt als basis de Energy Interoperation (EI) Version 1.0 OpenADR standaard, waarmee men profielen kan creëren, specifiek voor OpenADR-toepassingen en DER. Dit heeft geleid tot een OpenADR 2.0 profiel specificatie.

Deze specificatie beschrijft datamodellen voor signalen tussen VTN (Virtual Top Nodes) en VEN (Virtual End Nodes) of VTN/VEN paren. De modellen bevatten informatie over DR-last verlaging, shifting strategieën, die door beheerssystemen kunnen worden gebruikt. Hierbij publiceren VTN's de informatie en zijn VEN erop geabonneerd.



Figuur 1.5: Mogelijke relaties tussen VTN's en VEN's

Men heeft in de standaard een gradatie ingebouwd met 3 verschillende sets van attributen ook wel profiel genoemd, die een subset vormen van de algemene OpenADR standaard. Al deze sets kunnen zowel in commerciële, industriële als in residentiële omgeving in brede zin

toegepast worden, en zo volledig mogelijk automatisch deel te nemen aan DR-events.

Een eerste set is de OpenADR 2.0a Profile en bevat functionaliteit die zelfs de eenvoudigste toestellen, zoals een thermostaat, kunnen verwerken. Daarnaast heb je ook nog een c-profiel om een zeer uitgebreid IT gebaseerd systeem, bijvoorbeeld voor een aggregator, te bedienen, en een b-profiel dat een tussenvorm is. Dit alles maakt dat zowel eenvoudige als meer geavanceerde apparaten overweg kunnen met de meest frequente DR services en kunnen functioneren in verschillende marktmodellen.

Een ander uitbreiding vervat in OpenADR2.0 is de flexibele rapportage van historisch en toekomstige gegevens. Voor gedetailleerde informatie over de opbouw en structuur verwijzen we u naar de bron, <http://www.openadr.org/specification>.

Een belangrijke struikelblok in dit systeem is, door de eenvoudige implementatie boven op het http-protocol, is dat er communicatieproblemen kunnen ontstaan als een VEN achter een netwerkw firewall zit. Hierdoor kan het implementeren weer een stuk moeilijker worden.

1.4 DSM communicatie

In de volgende paragrafen worden verschillende communicatiemethodes overlopen die gebruikt worden voor DSM. Zowel oudere technologieën zoals PLC en verschillende busprotocollen als recentere methodes zoals Zigbee.

1.4.1 Power Line Communicatie (PLC)

PLC is een techniek waarbij er hoogfrequente signalen op spanninglijnen wordt gezet. CE-NELEC beheert de in Europa toegestane frequenties die in 4 verschillende frequentiebanden worden opgedeeld afhankelijk van de gebruikte toepassing. In het geval van DSM gaat het over de C-Band (125KHz tot 140KHz), specifiek voorzien voor thuisnetwerken met verplicht CSMA/CA protocol.

PLC is een zeer voor de hand liggend communicatiemiddel voor huishoudapparaten die standaard aan het elektrische net verbonden zijn, bovendien is er geen extra infrastructuur nodig en is de netbeheerder eigenaar van het transportmedium, namelijk het distributienet. Deze techniek wordt al gebruikt om bv. straatverlichting aan- en uitschakelen of dag- en nachttellers te sturen.

De laatste versie van dit protocol, G3-PLC is specifiek toegespitst op smartgrid communicatie. In december 2013 is G3-PLC mee opgenomen in de publicatie van de IEEE19.1.2-2013 standaard voor smart grid applications. Hierin wordt vastgelegd hoe de communicatie, zowel in stedelijk gebied als landelijk (over langere afstand), over laag- en middenspanningslijnen moet gebeuren en welke frequenties hiervoor beschikbaar zijn. De standaard richt zich meer specifiek op alle communicatie van het net met betrekking tot metermanagement, controle van het laagspanningsnet, energieverbruik, home area netwerk of het laden van elektrische voertuigen.

In ons land heeft Laborelec samen met de drie grootste netbeheerders een onderzoek gevoerd naar de problemen met betrouwbaarheid en performantie van PLC en parameters (o.a. belastingen, topologie, netcomponenten) die hierop invloed hebben [9]. Het resultaat is een toolbox om metingen in het veld te doen. Hiermee kunnen DSO's betere prototypes ontwikkelen om daarna in te zetten, in eerste instantie vooral in smartmeter pilootprojecten.



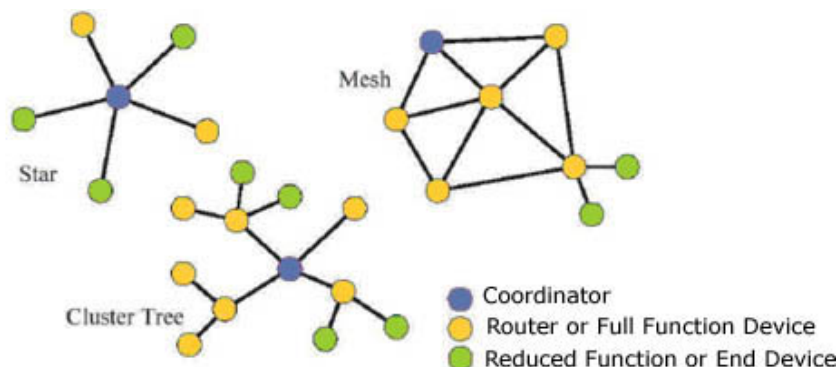
Figuur 1.6: Installatie en apparatuur voor performantietesten van PLC

1.4.2 Zigbee

Deze communicatievorm valt onder de 802.15.4 standaard van het IEEE, die draadloze Personal Area Networks (PAN) beschrijft. Het is een zeer simpel radio protocol, gericht op lage kosten, voor met batterijen uitgevoerde sensoren en toestellen die met elkaar kunnen communiceren en de kleine datapakketjes naar een centraal toestel sturen.

Dit bijkomende protocol is veel energiezuiniger en minder complex dan de bestaande korte afstandsprotocols voor draadloze communicatie, zoals Bluetooth. Daardoor is Zigbee dus makkelijker en goedkoper te integreren in bijna alle apparaten.

Een ZigBee netwerk is opgebouwd uit 3 verschillende types toestellen, een coördinator, één of meerdere eindtoestellen en één of meerdere routers. Het netwerk kan in stervorm als clus-



Figuur 1.7: Soorten Zigbee netwerken

ter of als mesh opgebouwd worden, zelfs combinaties zijn mogelijk. **ZigBee Coordinator**

vormt de enige wortel van het netwerk en zorgt voor de goede werking van het netwerk. De coördinator zet een netwerk op met een gegeven PAN-identifier. Daarnaast is er een **ZigBee Router** die naar een netwerk scant en dan lid wil worden. Verder draagt de router ook bij tot de coördinatie in het netwerk. Tot slot is er nog het **ZigBee End Device** die berichten kan ontvangen en verzenden.

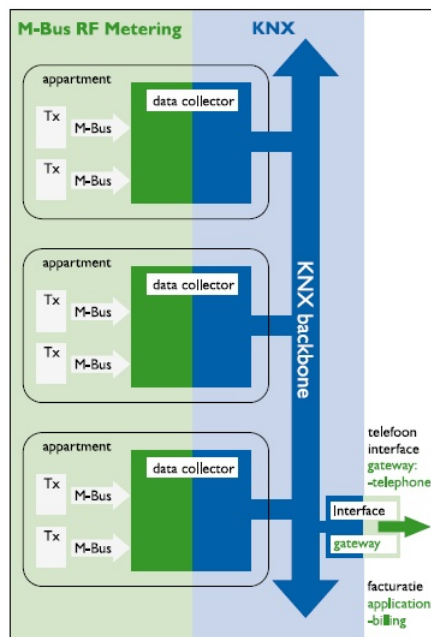
Een Zigbee-netwerk heeft een bereik van 100 meter en kan tot 65.000 apparaten ondersteunen. In het kader van DSM wordt Zigbee gebruikt om de slimme meter te laten communiceren met slimme toestellen in zijn netwerk. Een Zigbee End Device kan in energiezuinige slaapmodus gaan en binnen de 30ms terug uit de slaapmodus gehaald worden, en hebben hierdoor, in combinatie de lage transmissiesnelheid een laag verbruik en lange levensduur. De Zigbee Alliance is een non-profit organisatie die zowel de industrie, onderwijs en overheid samenbrengt om standaarden te ontwikkelen. De focus hierbij ligt vooral op energiemangement en -efficiëntie, automatisering van gebouwen en gezondheidszorg.

Met Zigbee is het onder meer mogelijk Demand Response, automatisch meter lezen, verlichting, koeling en verwarming te sturen. Hiertoe is een ZigBee Smart Energy 1.1 standaard ontwikkeld, die bijkomende functionaliteiten biedt, zoals tarifiering voor dynamische prijzen, het „tunnelen” van ander protocollen, voorafbetaling, online updates en blijvende compatibiliteit met versie 1.0.

Een tweede uitbreiding van Zigbee is het Smart Energy Profile 2 (SEP 2) die IP-gebaseerde controle biedt, zowel draadloos als bedraad, voor energiemangement in HAN's. Hierbij zijn uitbreidingen voorzien voor het laden van elektrische auto's, opzetten van HAN's in grotere gebouwen en appartementsblokken en ondersteuning voor het centraal beheren van meerdere energieservices.

1.4.3 KNX

KNX is een open standaard voor domotica- en immotica van gebouwen en huizen die zowel nationaal als internationaal erkend is. KNX is ontstaan uit bussystemen (EIB, AHS en BatiBUS) en via de nieuwe KNX-bus kunnen verbonden apparaten data uitwisselen via verschillende media, twisted pair (TP), radio frequentie (RF), powerline (PL) of ethernet (IP). KNX kan naast verlichting verwarming ook apparaten aansturen en verbinding maken met een slimme meter. KNX-installaties worden geconfigureerd met Engineering Tool Software (ETS), waarvan er eenvoudige en professionele varianten van bestaan.



Figuur 1.8: Voorbeeld van KNX communicatie

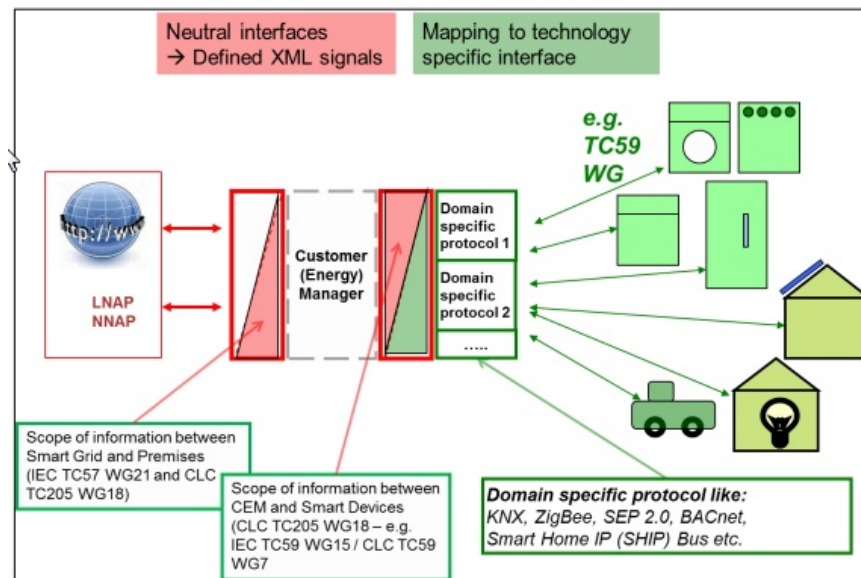
1.4.4 EEBus

Een van de factoren die een rem vormen op het doorbreken van smart homes is de heterogene markt van fabrikant-specifieke producten die eilandjes vormen en hier wil EEBus op inspelen. EEBus heeft zich als doel gesteld de interactie tussen het slimme net, het slimme huis en slimme toestellen te verzekeren en wil een rol spelen in de communicatie doorheen deze hele ketting.

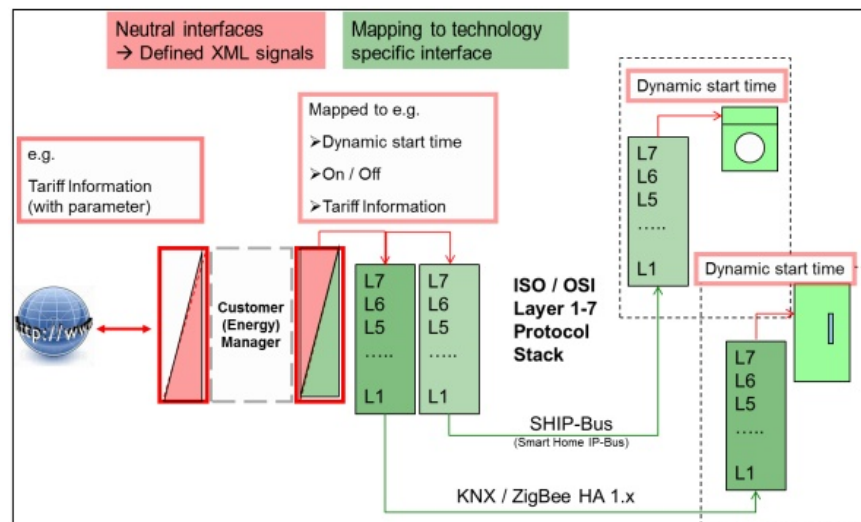
Door deze aanpak kan EEBus boodschappen, afkomstig van de netzijde, begrijpbaar tot aan de apparaatzijde brengen. Dit maakt van EEBus een soort vertaler van boodschappen tussen de verschillende standaarden en dit in de beide richtingen.

Door het EEBus framework beschikbaar te maken wordt het mogelijk om toch zeer verschillende interfaces en componenten met elkaar te laten samenwerken. Afhankelijk van de plaats in de ketting, smart-grid-home-device) kan de boodschap heel complex en uitgebreid of heel eenvoudig zijn. Deze vertaalslag kan via een Customer Energy Manager (CEM) die apparaten kan aansturen maar ook prijsinformatie verwerken, Zigbee Home Automation profielen of SEP2.0 profielen voor DR. Het framework van EEBus is een meer algemene standaard, terwijl de CEM een gepatenteerd component is, die het mogelijk maakt in dit framework allerlei algoritmes, services of logica te gebruiken. Een CEM kan zowel geïntegreerd in een toestel als apart functioneren.

Het EEBus Initiative voorziet een neutrale interface met een aantal mappings om de verschillende soorten signalen om te zetten naar bestaande standaarden



Figuur 1.9: EEBus interfaces



Figuur 1.10: EEBus mappings

1.5 In de praktijk

Al de technologieën die we tot nog toe aanhaalden zijn, in beperkte mate, beschikbaar op de markt. De meeste domotica en toestellen voor thuisnetwerken voldoen (nog) niet aan de definitie van een DSM systeem. Ze voorzien de gebruiker in eerste plaats van informatie en in tweede instantie ook controle. De gebruiker kan via de toestellen het verbruik volgen, apparaten aansturen, afschakelen, enz... . Om echt aan DSM te doen vereist het systeem de flexibiliteit om te reageren op lokale of globale variaties van vraag en aanbod in het elektrische net. In proefprojecten uit punt 1.6 die later besproken worden is deze flexibiliteit wel toegevoegd.

Wat volgt is de bespreking van enkele systemen, zonder een voorkeur te willen aangeven. De functionaliteiten van de hierna besproken systemen vormen een terugkerende basis bij de

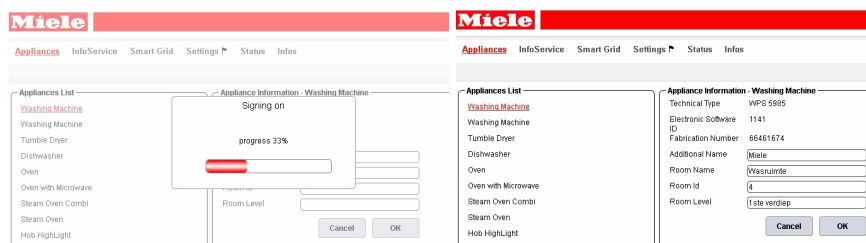
meeste fabrikanten. Vandaar dat we er slechts deze uitpikken.

1.5.1 Miele@Home

Miele heeft een aantal slimme huishoudapparaten die kunnen communiceren met een Miele@Home-gateway en zo hun inschakelgedrag kunnen automatiseren. Deze functionaliteit is op dit moment enkel in de high-end apparaten ingebouwd maar voorziet Miele ook voor de nieuwe generatie midrange toestellen.

Miele heeft met de XGW200 een gateway ontwikkeld die met zowel PLC als KNX technologie werkt. In de loop van 2014 gaat Miele een nieuw model lanceren XGW300. Hiermee maken ze de overstap van PLC-KNX naar de opkomende standaard Zigbee.

Via de webinterface uit figuur 1.11 kan de gebruiker zoeken naar bereikbare apparaten. Eventueel kan de gebruiker de verkregen info aanvullen met info over de ruimte of verdieping waar ze staan.



Figuur 1.11: Miele@Home registratie interface

Verder is het met de XGW gateway mogelijk manueel een vijftal tariefplannen zelf te programmeren of via internet van de leverancier deze informatie te betrekken, meestal enkel in het kader van proefprojecten.

Daarnaast kunnen de feestdagen toegevoegd en is een overzicht van de actuele apparaatstatus (figuur 1.12).



Figuur 1.12: Apparaatstatus, gebruiker behoudt Start/Stop controle

De gateway wordt met het internet verbonden via UTP-breedband en voorziet verschillende standaard interfaces, onder meer Zigbee, USB en Wifi. Het ontwikkelen van deze gateway is geen kerntaak voor Miele maar helpt hun wel bij de ontwikkeling van slimme toestellen en houdt de vinger aan de pols om zo de laatste trends te kunnen implementeren in hun toestellen.



Figuur 1.13: Overzicht tarieven

1.5.2 SMA Smart Home

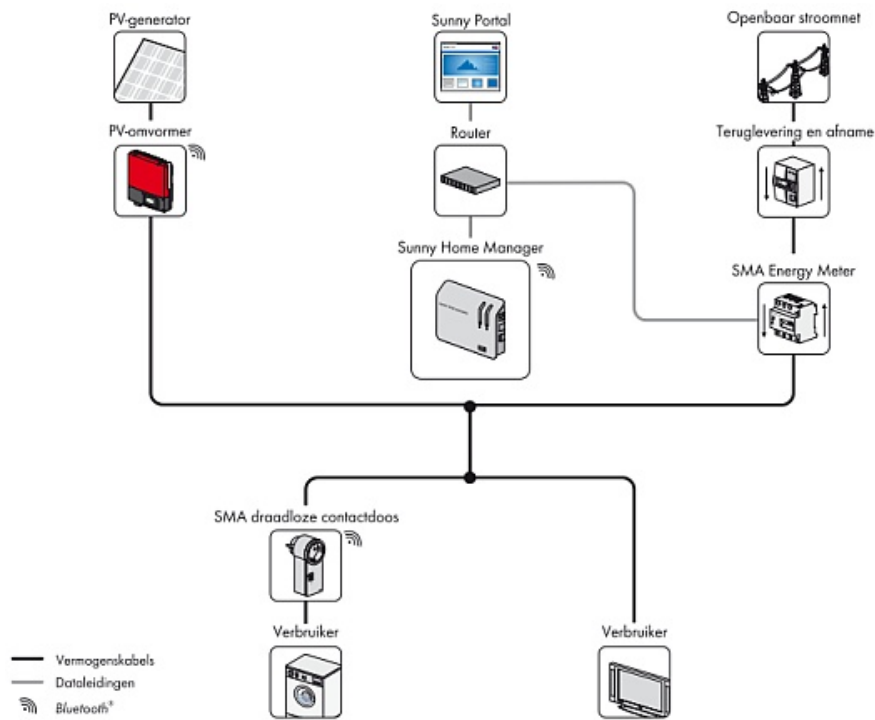
SMA heeft verschillende modulaire systemen voor DSM, Sunny Home Manager en Flexible Storage System.

Sunny Home Manager

Sunny Home Manager uit figuur 1.14 is bij SMA de basisoplossing voor residentieel DSM, waarbij alle energiestromen van en naar het net nauwkeurig worden geregistreerd. Op basis van deze informatie geeft de energiemanager de gebruiker feedback over zijn energieverbruik via een webinterface, de SMA Sunny Portal.

Doel is bewustworden en kennen van het eigen verbruik. Dit is vrijwel altijd een eerste stap naar DSM. Een volgende deel van de oplossing zijn draadloos bestuurbare stopcontacten om verbruikers automatisch te besturen. De eerder besproken Miele@Home-gateway is compatibel met de Sunny Home Manager.

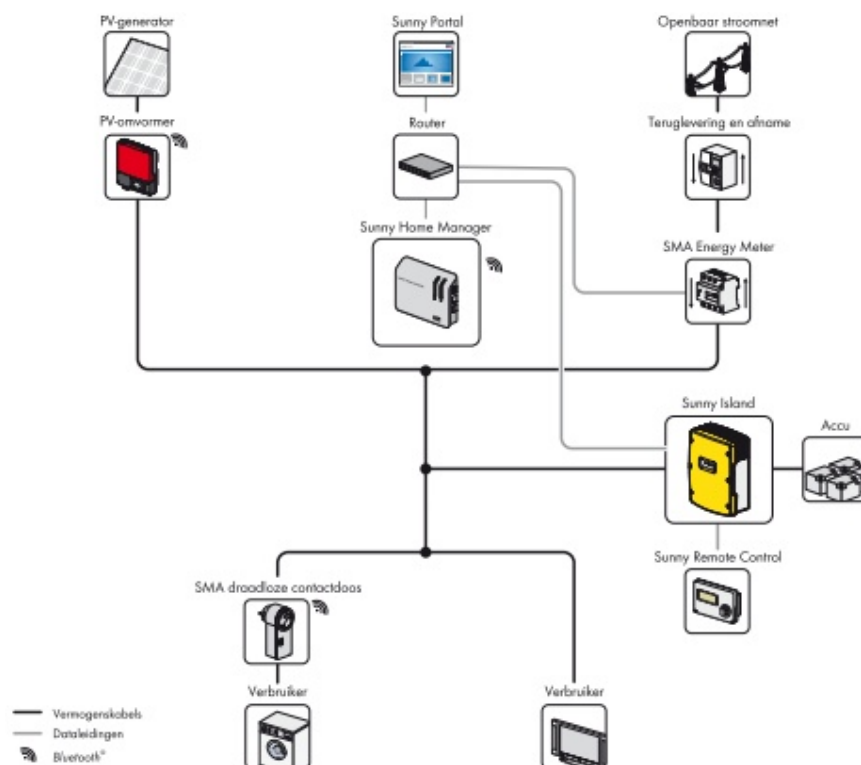
Hiermee kan de Home manager de grote verbruikers inschakelen op momenten dat de PV-installatie de grootste opbrengst heeft. Volgens SMA kan het aandeel eigen verbruik hiermee worden opgetrokken van 30% tot 40% of één derde.



Figuur 1.14: Voorbeeld installatie SMA Sunny Home Manager

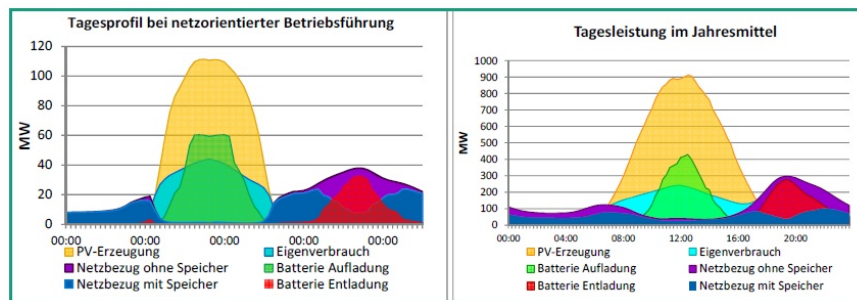
Flexible Storage System

Naast de Sunny Home manager biedt SMA Flexible Storage System uit figuur 1.15 aan om lokaal opgewekte PV-energie op te slaan in batterijen. Hierdoor kan de gebruiker rekenen



Figuur 1.15: SMA voorbeeld installatie met flexibele batterij opslag.

op een kleine reserve om de timing van eigen verbruik te verschuiven, te zien in figuur 1.16. Hierdoor kan het aandeel eigen verbruik tot 65% stijgen volgens SMA. Hiermee wilt SMA inspelen op de mogelijkheden van lokale opslag. De netbeheerders zijn vragende partij voor een (permanente) begrenzing van het teruggeleverde vermogen op een vaste waarde of een percentage van het geïnstalleerde vermogen, om zo de eigenaars te laten bijdragen aan de netstabiliteit. Momenteel is er veel discussie over de subsidiëring van PV-installaties en in de



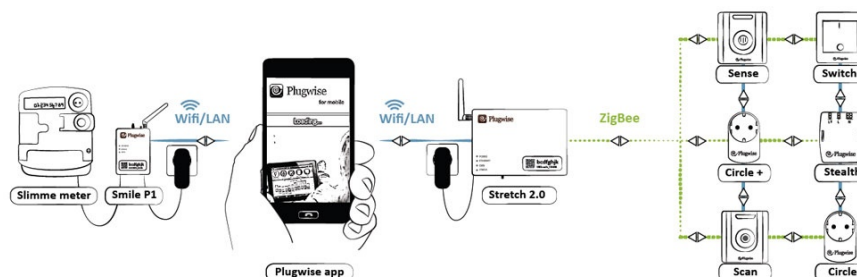
Figuur 1.16: Dagprofiel met batterijen en verschuiving eigenverbruik

toekomst zullen er meer voorwaarden aan subsidies gekoppeld worden en zo de mogelijkheid om energie terug op het net te sturen te beperken.

Zo heeft Duitsland al een subsidie uitgeschreven voor PV-installaties kleiner dan 10kW waarbij elke kW opgeslagen energie kan rekenen op subsidie. Een beslissing die genomen werd op basis van een studie van het FraunhoferInstitut für Solare Energiesysteme (ISE). In de studie werd gepeild naar de effecten van batterijgebruik bij PV-installaties. Uit de studie bleek dat het gebruik van batterijen, de pieklast op het net 20 tot zelfs 40% kan doen dalen, afhankelijk van de grootte van de PV-installatie en totale batterijcapaciteit.[18]

1.5.3 Plugwise

Plugwise is een vrij uitgebreid draadloos energiemanagementsysteem dat feedback geeft, verbruik meet en verbruikers kan schakelen. Het systeem is modulair opgebouwd uit verschillende apparaten die samen in een netwerk zitten zoals te zien in figuur 1.17.



Figuur 1.17: Overzicht van het Plugwise systeem

De mogelijk eerste schakel in het Plugwise-systeem is, naast de aanwezigheid van een slimme meter, de **Smile-P1** module. Die maakt de gegevens van de slimme meter via de P1-poort beschikbaar via een draadloze of UTP netwerkverbinding. Via een zogenaamd P1 datatelegram worden de meetgegevens verstuurd. Verder is het toestel compatibel met meters die

voldoen aan de DMSR 3.0 en hoger.

De gegevens zijn te raadplegen via een app die bestaat uit 4 onderdelen, een eerste is de hoofdmeter die het actuele verbruik weergeeft in kilowattuur of de kost van dit gebruik per dag.

Een tweede deel geeft een aantal inzichten in het verbruik, zoals mogelijke besparingen, jaarprognose en profielvergelijking. Een derde onderdeel geeft de verzamelde gegevens weer in aanpasbare grafieken. Tot slot worden in het laatste onderdeel nog een aantal besparingstips gegeven.

Een volgende schakel is de **Home Stretch**, een gateway die het mogelijk maakt om stopcontacten aan te sturen. Hierbij is ook gekeken naar nationale verschillen zoals bv. stekkeruitvoering, in 4 types.

De **Circle** is een schakelbare energiemeter die tussen het stopcontact en de apparaatstekker zit. De Circle onthoudt het gemeten verbruik en stuurt de gegevens via een draadloos ZigBee netwerk naar Plugwise Software of een Stretch-module en van daaruit naar de Plugwise app. Ook hier zijn er uitvoeringen voor de verschillende stekkeraansluitingen.

De **Circle+** is een iets intelligenter toestel dat helpt het Zigbee-netwerk op te bouwen en optreedt als coördinator. Hiervoor heeft hij een realtime klok en synchroniseert de tijd met de overige Circles. De **Stealth/Stealth+** zijn compactere vormen van de Circle/Circle+ die gebruikt worden om in te bouwen.

De **StealthM** heeft geen relais en kan dus niet schakelen en wordt overwegend gebruikt als meetmodule voor een PV-installatie.

Met de **Sense**-module is het mogelijk de temperatuur (bereik tussen 0 en 60°C) en luchtvochtigheid (5 tot 95% RH) van ruimtes te meten en eventueel hieraan bepaalde schakelacties te koppelen.

De **Scan** is een bewegingsdetector die het licht aanschakelt bij beweging en onvoldoende daglicht. De Switch is een draadloze schakelaar die één of meerdere Circles of Stealths en dus ook de verbonden apparaten kunnen schakelen. Via de app kan ingesteld worden welke schakelaars welke apparaten bedienen.

Daarnaast biedt Plugwise ook nog een deel uitbreidingen voor zowel hard- als software, bv. voor grotere netwerken, data export, scriptingen en submetering.

Het groeipotentieel van dit soort producten wordt aangetoond door nieuwe initiatieven zoals volgende Kickstarterproject. Op 5 januari dit jaar zijn er voldoende fondsen verzameld voor heel vergelijkbaar, maar minder uitgebreid product onder de naam Plugaway[19]. In vergelijking tot Plugwise is dit product opener, waardoor gebruikers er hun eigen app voor kunnen schrijven.



Figuur 1.18: Plugwise assortiment

1.5.4 Fifthplay

Fifthplay, een dochteronderneming van de Niko Group, heeft een uitgebreid assortiment apparaten die, net als Plugwise, in eerste instantie voor energiemanager bedoeld zijn. Met de verschillende toestellen kan de gebruiker zijn energieverbruik optimaliseren terwijl zijn comfort behouden blijft.

De **Home Area Manager**(HAM) is de centrale eenheid in het systeem en is aan de



Figuur 1.19: Fifthplay overzicht van producten en diensten

éné kant aan het internet verbonden, via ethernet, wifi of grps. De HAM maakt hierlangs verbinding met een cloudplatform, E-core, dat zorgt voor veilige communicatie, updates en configuratie. Naast het instellen van de gateways is het ook mogelijk om eigen webservices te configureren. Deze webservices zorgen voor het ontsluiten van verzamelde gegevens via het internet of apps.

Aan de zijde van de HAM worden de toestellen in huis verbonden.

Smart Switches zijn schakelaars die op afstand kunnen worden bediend, zowel fysiek als via smartphone. Er kan een volledig schema ingesteld worden om de lichten te bedienen. Een feature in ontwikkeling is een schakelaar die de status van de woning doorgeeft aan de elektriciteitsleverancier die dan specifieke dienstverlening of tarieven kan aanbieden..

Smart Plugs zijn toestellen die tussen het stopcontact en de stekker van een toestel zitten

en ook op afstand kunnen worden in- en uitgeschakeld.

De **DINrail-plug** is ook een gateway die ingebouwd wordt en toestellen of hele kringen kan meten en schakelen. Ze kan ook worden gebruikt om de opbrengst of rendement van de PV-installatie te meten.

Om het energieverbruik van bestaande toestellen op te nemen zonder breekwerk is de **inductieklem** gemaakt, om eenvoudig rond een elektriciteitsleiding te klikken.

Verder is er de **slimme thermostaat** ook verbonden met de gateway die de verwarming kan aansturen.

Naast al deze toestellen is een belangrijk aspect voor energieoptimalisatie het meten van effectief verbruik. Om het verbruik centraal te kunnen registreren heeft Fifthplay een **Multi Utility Controller** (MUC) ontwikkeld.

Deze MUC kan al dan niet draadloos verbinding maken met de meeste meters, zowel analoog, pulse als slimme meters via optische sensoren, pulsesensoren, inductieklemmen of de P1-poort.

De informatie uit deze centrale meting zal een nieuw type dienstverlening voor energieleveranciers, netbeheerders en energie service bedrijven (ESCO's) vergemakkelijken.

Onder andere diensten zoals TOU, DR kunnen hierdoor eenvoudiger uitgerold worden.



Figuur 1.20: Fifthplay Plug, DINrail en thermostaat

In de toekomst zal de elektrische wagen verder doorbreken en moet dus ook geïntegreerd worden in het net. Binnen het Vlaamse proeftuin project Linear heeft Fifthplay een systeem ontwikkeld om de voor de consument optimale tijdsplanning voor het opladen van de elektrische auto. Door deze informatie te delen met de leverancier kan het laden zodanig gebeuren dat de consument aan een beter tarief oplaadt. De leverancier van zijn kant kan rekening houdend met de toestand van het net, eventueel overtollige energie makkelijker kwijtraken.

Zoals eerder aangegeven zijn dit slechts enkele systemen. De komende jaren zullen er meer producenten inpakken op de evolutie van residentieel DSM en ook ervaringen uit proefprojecten, waarvan een aantal in de volgende sectie worden besproken, zullen bijdragen aan verdere en nieuwe ontwikkelingen op dit vlak.

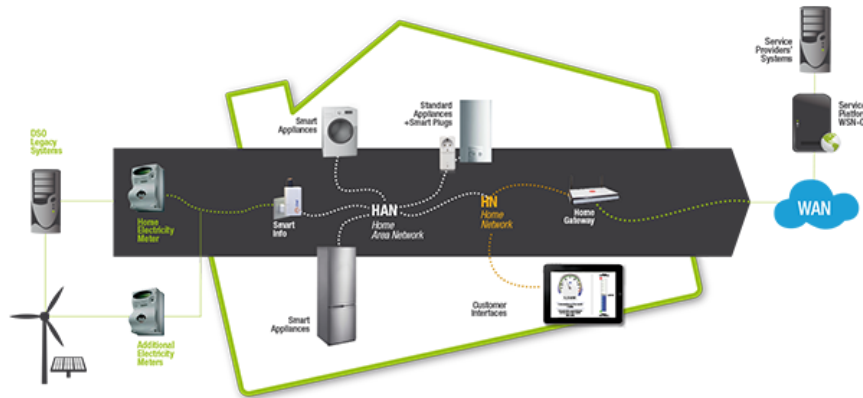
1.5.5 Energy@Home

Energy@home is een non-profit organisatie opgericht door onder meer Electrolux, Indesit, Enel Distribuzione en Telecom Italia. Energy@Home promoot technologie en diensten voor energiemangement in een thuisomgeving, door structuur te brengen in de communicatie van de verschillende apparaten.

Dit trachten ze te realiseren door de noden te identificeren en te beschrijven, die nodig zijn om binnenhuis een communicatieplatform te bieden voor dsm. Hiervoor werken ze samen met de Zigbee Alliance, en is in het verleden Home Automation 1.2 specificatie ontstaan. Deze specificatie beschrijft de communicatie, syntax en semantiek van boodschappen tussen apparaten.

Uiteindelijk doel is, onafhankelijk van producent of apparaat, communicatie tot stand brengen tussen verschillende toestellen en/of systemen. Aan de ene kant van het HAN bevindt zich de slimme meter die informatie deelt en ontvangt van de DSO door middel van PLC. De andere kant zijn de toestellen in huis die via Zigbee verbonden zijn.

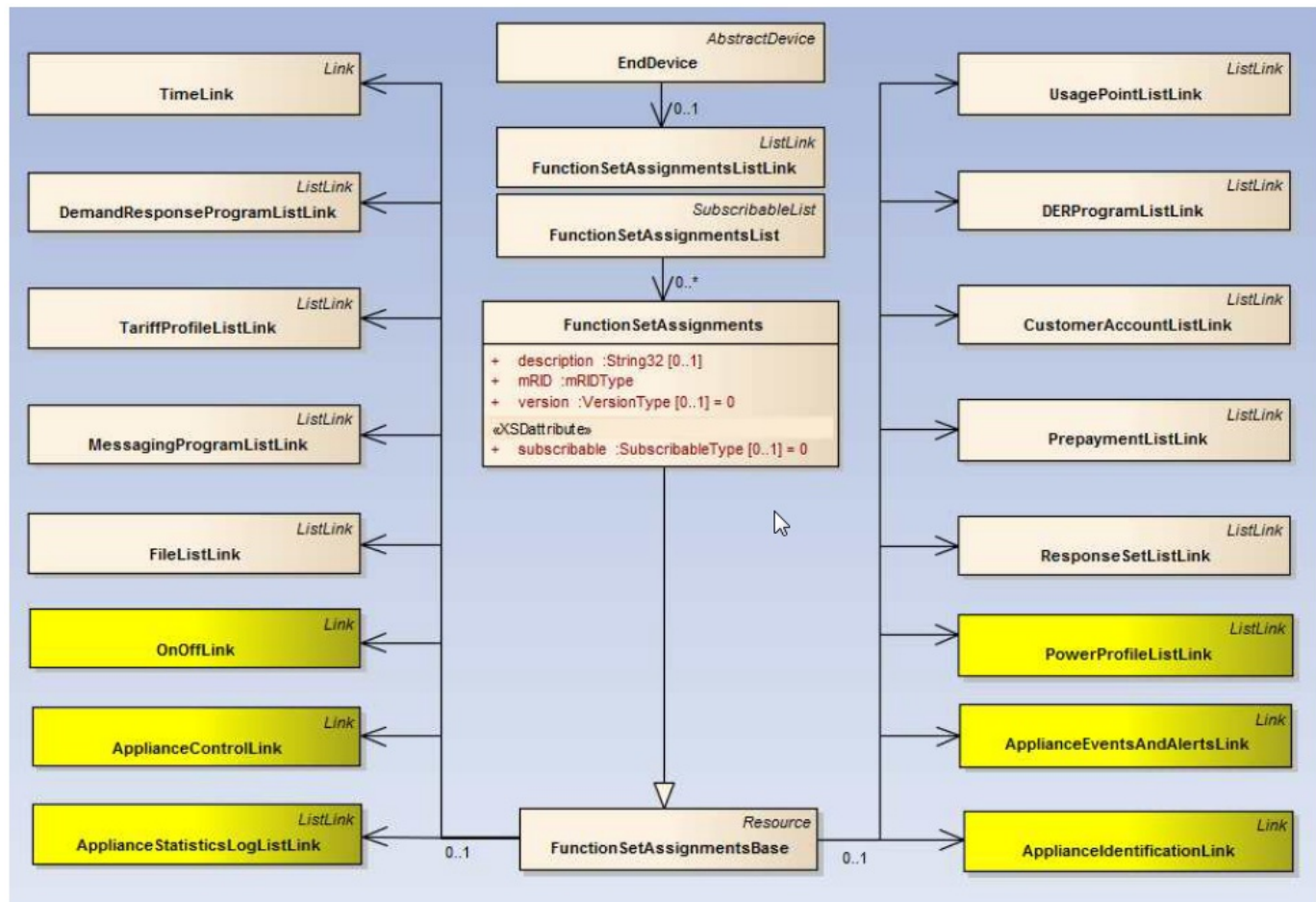
Er wordt onderscheid gemaakt tussen traditionele toestellen, die enkel via een smartplug te bedienen zijn en meer geavanceerde toestellen. Voor de traditionele toestellen heeft Energy@Home enkele basisgegevens gedefinieerd die de gebruikte smartplug verschaft, zoals



Figuur 1.21: Energy@Home architecture

energieconsumptie, ogenblikkelijk vermogen en geschikte momenten om af te schakelen. De geavanceerdere varianten zijn slimmere toestellen, die zelf verbonden zijn en die deze functionaliteiten in zich dragen. Zij kunnen naast diezelfde informatie, ook last, status, automatisch start, diagnose-info,... delen. Deze toestellen kunnen worden aangestuurd met zogenaamde vermogenprofielen. De CEM kan van met de ontvangen vermogenprofielen een planning opmaken om het verbruik te optimaliseren rekening houdend met de gebruikerswensen.

Energy@Home wil de Zigbee HomeAutomation uitbreiden met een aantal bijkomende functionaliteiten die volgens hun ontbreken. Op figuur zijn deze uitbreidingen in het geel weergegeven. De voorgestelde aanpassingen zitten zowel in de slimme meter, timing en prijs functionaliteiten. In figuur 1.23 geven ze aan welk attribuut ontbreekt of onvolledig is en hoe ze dit graag opgelost zien.



Figuur 1.22: Energy@Home Aanpassingen

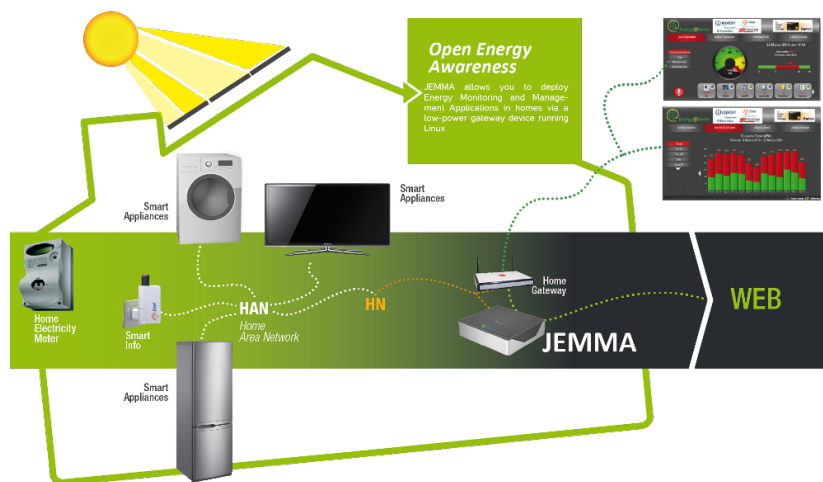
LastSetTime – CC 1906

Type of request	Existing Spec – Technical
Applicable working group	
Doc # / Filename	13-0200-00 sep2-smart-energy-profile-2
Section	15.1.7
Page	
Line	
Subject	New attribute
Problem / Comment	In the Time object an attribute is missing in order to indicate the most recent time that the currentTime attribute was set, either internally or from the network.
Suggested Remedy	Introducing a new attribute called <i>LastSetTime</i> , in indicating the most recent time that the currentTime attribute was set, either internally or from the network. This value can be represented as a TimeType (signed 64-bit value).

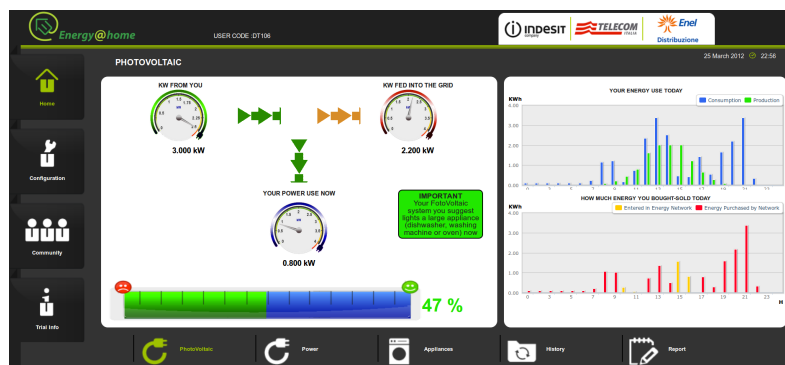
Figuur 1.23: Energy@Home Uitbreiding functionaliteit

JEMMA- Java Energy ManageMent Application framework.

Een volgende stap die Energy@home zet is JEMMA, een op linux gebaseerd open-source framework dat de specificaties van Energy@home gebruikt en zowel Zigbee Home Automation 1.2 en ZigBee Gateway standaarden ondersteunt. Met deze gratis software, <https://github.com/ismb/jemma> kunnen de verschillende slimme toestellen worden gevonden en maakt ze daarna bereikbaar voor andere programma's. Er kan dus eigen programmatie gebeuren op het bestaande JEMMA platform.



Figuur 1.24: Energy@Home JEMMA Architectuur



Figuur 1.25: Energy@Home JEMMA Gui

1.6 DSM projecten

1.6.1 Smart Grids Model Region Salzburg (SGMS)

Smart Grids Model Region Salzburg (SGMS) is een project dat via onderzoek en een waaier aan pilootprojecten wil tonen hoe slimme netwerken er kunnen uitzien. Door in te zetten op verschillende toepassingsgebieden van slimme netwerken willen ze synergieën zoeken tussen de verschillende energienetwerken. Wij zullen ons focussen op de integratie van residentiële klanten.

Het belangrijkste aspect bij de integratie van residentiële klanten in het net is het aanpassen van hun gedrag. Intelligente technologieën bieden consumenten de mogelijkheid om een actieve rol te spelen in optimalisatie van het net. Dit kan op verschillende wijzen, gaande van feedback over elektriciteitsverbruik tot het automatisch aansturen van huishoudapparaten.

Binnen het SGMS zijn er drie projecten die de rol van de residentiële consumenten en hun participatie in het net onderzocht. De focus lag vooral op het leveren van feedback op het gebruikspatroon en aanbevelingen om elektriciteitsverbruik te verschuiven naar momenten die gunstiger zijn voor het systeem.

Consumer to Grid (C2G) - Feedback over energieverbruik

Via het C2G-project werden gedurende een jaar, verschillende manieren van feedback onderzocht. Eén hiervan is Wattson, een hip toestel dat aantoont dat dit soort apparaten niet altijd saai en lelijk moeten zijn. Dit toestel meet zowel het totale verbruik als het verbruik van individuele apparaten. Deze meetwaarden worden als cijfer getoond en daarenboven schijnt er een gezellig rood licht dat dimt naargelang het verbruik daalt. Daarnaast slaat deze gadget de gegevens op en kunnen ze gedownload worden naar de computer, om zo via een online community, strategieën te delen om je energieverbruik te verminderen.

Daarnaast zijn er nog klassiekere manieren om de gebruiker te informeren, zoals de maandelijkse elektriciteitsrekening, een scherm in huis en een webportaal.



Figuur 1.26: Enkele voorbeelden van feedback aan de consument over hun energieverbruik



Figuur 1.27: Een hippe vorm van feedback: Wattson display

Hieruit werden volgende aanbevelingen geformuleerd om goede feedbackstrategieën te ontwikkelen:

- eenvoudige implementatie gecombineerd met minimale kosten waarbij de wijze van feedback aangepast is aan het besparingspotentieel.
- een combinatie van verschillende feedback technieken die een goed evenwicht vormen tussen de verschillende methodes, zoals een constant beschikbare home display met realtime feedback, maandelijks informatie over verbruik. Daarbij gebruik makend van de laatste technologische standaarden.

Algemeen kan worden gesteld dat de constante beschikbaarheid van feedback de mensen helpt om deze feedback ook effectief te gebruiken. Dit effect kan worden versterkt door de combinatie van regelmatig aangeboden (push)info waarvoor de gebruiker geen handelingen moet doen. Bijkomend kan extra functionaliteit worden geboden om op langere termijn de interesse van de gebruiker te blijven verzekeren, bv. door concrete stappen voor te stellen, een aspect dat door het PEEM project is onderzocht.

Persuasive End-User Energy Management (PEEM)

Voor het PEEM project heeft men een eenvoudig energieverbruik feedback systeem ontworpen, FORE-Watch (**F**orecast **O**f **R**enewable **E**nergy). Als bijkomende functionaliteit werd de gebruiker, naast actuele verbruik, ook met de interface uit figuur 1.26 via eenvoudige kleurcodes geïnformeerd over het goede (groen), gemiddelde (oranje) of slechte (rood) moment om energie te verbruiken.

De gebruikers van dit systeem pasten hun gedrag enigszins aan en verschoven vooral het



Figuur 1.28: FORE-Watch feedback systeem met kleuren

gebruik van wasmachine, droogkast en vaatwasser naar *groene* periodes op hun klok. Hoewel hun oude gewoontes moeilijk waren te doorbreken, gaven de deelnemers aan dat enkel duidelijke voordelen, zoals een extra financiële stimulans, effectief tot gedragswijziging zouden leiden. Daarnaast spelen ook altruïstische motieven mee in hun gedragswijziging, die worden gezien als hun persoonlijke bijdrage aan milieu en maatschappij.

Uit deze projecten bleek ook dat enkel feedback verschaffen over elektriciteitsverbruik slechts marginale interesse wekt bij de gebruiker. Het zou daarom zinvol zijn ook andere diensten toe te voegen zoals gas, water of verwarming, zeker als die een grotere kost vormen voor de consument. Verder blijkt het nodig, feedback te combineren met extra services, zoals bv. alles uit-functie, meldingen, hulp of tips bij problemen,...

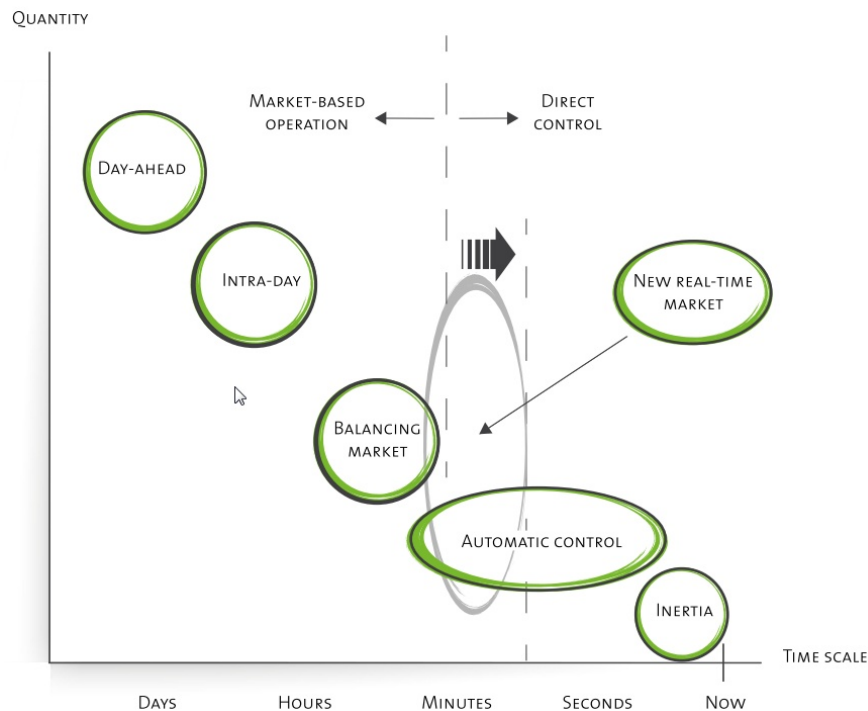
De vraag hierbij is of bijkomende voordelen uit geïntegreerde home automation de interesse in energiegebruik langer kan opwekken. Men heeft meestal moeite om de aandacht voor feedback over energiegebruik langer vast te houden. Het antwoord op deze vraag moet blijken uit toekomstig onderzoek zoals het HiT project. HiT staat voor Buildings as interactive smart grid participant, en wil een oplossing bieden om verschillende smartgrid toepassingen in gebouwen te groeperen voor een innoverende woongemeenschap.

1.6.2 EcoGrid

Doel van dit Deense project is aantonen dat moderne informatie en communicatietechnologie samen met vernieuwende marktoplossingen ervoor kunnen zorgen dat tot 50% van de elektriciteitsverbruik uit HEB kan komen.

Opzet

Ze realiseren dit door gebruik te maken van een nieuwe realtime markt voor elektriciteit. Deze markt benut ten volle de flexibiliteit van residentieel verbruik door gebruik te maken van DSM en slimme huizen. Figuur 1.29 geeft de positie van deze markt in de huidige context.



Figuur 1.29: EcoGrid binnen huidige markten

Door te kunnen reageren op externe signalen in combinatie met bijna realtime beschikbare gegevens over verbruik en productie, kan men met modellen vrij accuraat eerst verbruik en productie voorspellen en daarna de elektriciteitsprijs bepalen.

Daarnaast wordt er direct feedback, via displays en apps zoals in figuur 1.30 over prijzen en eigen verbruik voorzien naar de klanten. Hierdoor kan de klant worden geïnformeerd, gemotiveerd en gesensibiliseerd in de hoop uiteindelijk zijn gedrag aan te passen aan de werkelijke elektriciteitsprijs.

De deelnemers werden ingedeeld in een statistische controlegroep, een groep met manuele en één met automatische controle. Terwijl de manuele groep enkel informatie kreeg over verbruik, prijs en prijsvoorspellingen, kreeg de automatische groep hetzelfde feedback systeem maar ook bijkomende apparatuur om hun verbruik te optimaliseren. In de automatische groep werd er voorts een onderscheid gemaakt door toepassing van twee verschillende implementaties om de mate van respons voor beide technieken te bepalen.

Om het concept later breed inzetbaar te maken werd gekozen voor een marktconcept dat overweg kan met de bestaande elektriciteitshandel en balanceermarkt. Om het project

2,000 participating customers in the demonstration



Statistic control group

200 households with smart meters

No access to specific information or 'smart' equipment



Manual control group

400-500 households with smart meters

Receiving simple market price information

Must move their energy consumption by themselves



Automatic control group

700 automated households with IBM Green Wave Reality equipment and smart meters

All houses have heat pumps or electric heating all responding autonomously to price signals



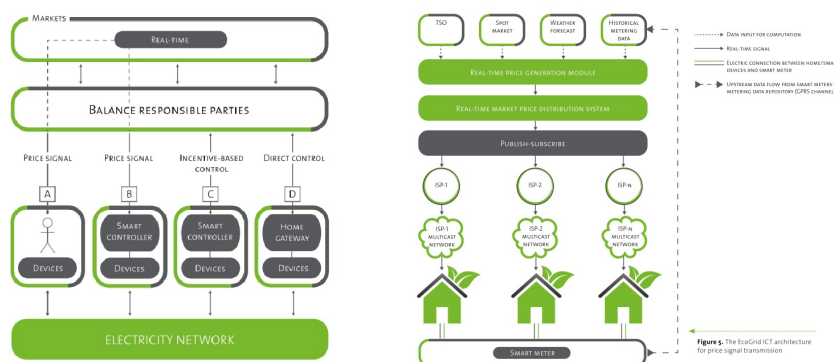
Automatic control group

500 automated households with Siemens equipment and smart meters

All houses have heat pumps, or electric heating all responding to aggregator control



Figuur 1.30: EcoGrid Indeling residentiële deelnemers en Feedback app



Figuur 1.31: EcoGrid Prijsbepaling en vormen van realtime price response

realistisch uit te voeren werden de deelnemers in de mate van het mogelijke geïsoleerd van de rest van de markt. De opzet van de realtime marktsystemen werd gebaseerd op bestaande, robuuste softwaresystemen van de industriële partners. Er werd bewust geen gebruik gemaakt van nieuw te ontwikkelen standaarden voor hard- en software maar wel de nieuwste ICT-oplossingen.

Belangrijke bevindingen

Het zal moeilijk zijn om dit op een Europees niveau te doen, mede door de vele verschillen in de deelstaten, zowel qua marktwerking als wetgeving. Ook de integratie in bestaande systemen zal niet overal even evident zijn.

Verder is in dit project een 5-minuten basis gebruikt, dat maakt het halen van de vooropgestelde resultaten in omgevingen waar de gegevens op kwartier- of zelfs uurbasis beschikbaar zijn, te optimistisch.

Daarnaast zijn de mate van standaardisatie op gebied van communicatie en interface van toestellen van verschillende producenten, het verzekeren van beveiliging en privacy, belangrijke factoren.

Verder moet de rol van de TSO uitgeklaard worden, ofwel is hij de enige verantwoordelijke voor de onbalansprijs en kunnen BRP's zelf bepalen welk risico ze nemen door wel of niet te reageren op de prijzen. Een alternatief kan zijn de BRP of VPP beheerders met een portfolio aan klanten, de prijs laten bepalen door te bieden in de markt, met als voordeel dat er geen aanpassing of bijkomende niveaus in de markten ontstaan. In het eerste alternatief zal de prijs optimaler zijn dan in het tweede volgens de projectleiders.

Goede communicatie en betrokkenheid van de deelnemers is nog een belangrijke voorwaarde voor het welslagen van dit soort projecten. Vooral op langere termijn is er noodzaak aan blijvende interesse van de deelnemers. Door goede communicatie kon er beroep gedaan worden op het goede burgerschap van de deelnemers, meer nog dan financiële motieven.

Conclusies

Het EcoGrid project toont aan dat het wel degelijk mogelijk is kleine producenten en residentiële verbruikers inschakelen voor DSM. De vereisten hiervoor zijn de nodige inzet en de juiste randvoorwaarden, zoals de aanvaarding van het realtime systeem door de huidige marktspelers. Het potentieel hiervoor kan ten volle worden benut door aan de verschillende betrokkenen te tonen dat het voor ieder van hun een economische meerwaarde biedt. Zonder daarbij weliswaar de werking van het net in de problemen te brengen.

1.6.3 PowerMatcher

PowerMatcher is een veilingssysteem dat autonoom werkt en gebaseerd is op twee belangrijke principes. Ten eerste is het een multi-agent systeem (MAS). Bij een MAS communiceren intelligente elementen, op volledig autonome wijze met elkaar, op dezelfde manier waarop bvb. verschillende routers in een netwerk elkaar vinden en met mekaar communiceren. De verschillende entiteiten kennen (entiteiten uit) hun directe omgeving maar niet noodzakelijk het hele systeem.

Een tweede principe is een elektronische marktplaats, gecreeërd naar micro-economisch model, waarbij het systeem streeft naar een optimaal marktevenwicht, zowel economisch als technisch, om een equilibriumprijs te bereiken, het punt waar productie en verbruik in evenwicht zijn. In dit marktgebaseerd systeem zijn spelers of agents actief die elektriciteit willen verhandelen, zowel produceren als verbruiken. Verschillende agents hebben een verschillende taken, waarvoor ze deze elektriciteit gebruiken, maar daarnaast ook een gezamenlijk doel, een kostprijs vastleggen voor elektriciteit. Door gebruik te maken van micro-economische marktmechanismen wil het systeem de deelnemers (individueen, huishoudens, bedrijven, ...) aanzetten tot bepaald gedrag, en dit zonder ze onder directe en centrale controle te plaatsen.

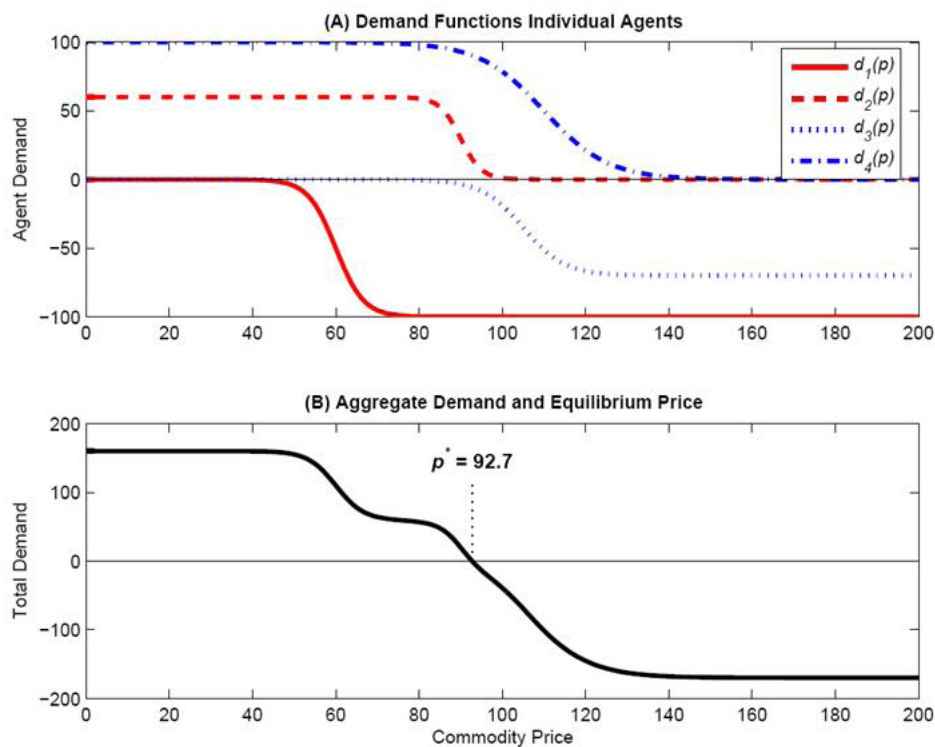
Werkingsprincipe

Powermatcher kan best worden gezien als veilingmarkt, waarbij de markt is opgebouwd uit verschillende type spelers die elektriciteit verhandelen. Elke speler is in feite een lokaal toestel, apparaat of installatie onder controle van een agent. Een droogkast kan voor een bepaalde prijs energie afnemen, een CHP levert voor een bepaalde prijs.

Elk vast interval, meestal 15 minuten is er een biedronde waarbinnen de agents hun bod uitbrengen. De lokale control-agents staan in verbinding met een beheerder van de markt, de market-agent of veilingmeester. De lokale control-agent maakt op de (lokale) markt zijn vraag/aanbod naar elektriciteit bekend als bod, een bod dat simpelweg stelt hoeveel elektriciteit de lokale control-agent wilt consumeren/producen en tegen welke prijs.

Nadat alle agents hun bod hebben uitgebracht, verzamelt de veilingmeester al deze info en berekent hieruit het evenwicht met daaraan gekoppeld een prijs. Deze prijs wordt terug gecommuniceerd naar de lokale agents die, in het komende interval, hun bod uitoefenen tegen de afgesproken prijs. Sommige agents zullen altijd afnemen omdat ze onmiddellijk moeten werken als ze aangezet worden, bvb. een televisie.

In figuur 1.32 wordt dit prijsvormingsproces versimpeld voorgesteld, door slechts vier deelnemers. De bovenste curves stellen 2 verbruikers voor, wiens vraag naar elektriciteit afneemt



Figuur 1.32: Prijsbepaling bij PowerMatcher

tot nul naarmate de prijs toeneemt. De onderste twee curves zijn twee producenten die bereid zijn elektriciteit te produceren (hier voorgesteld als negatieve consumptie) vanaf een

bepaalde prijs tot aan hun maximum productiecapaciteit.

Deze curves worden daarna samengebracht om de prijs voor evenwicht te bepalen.

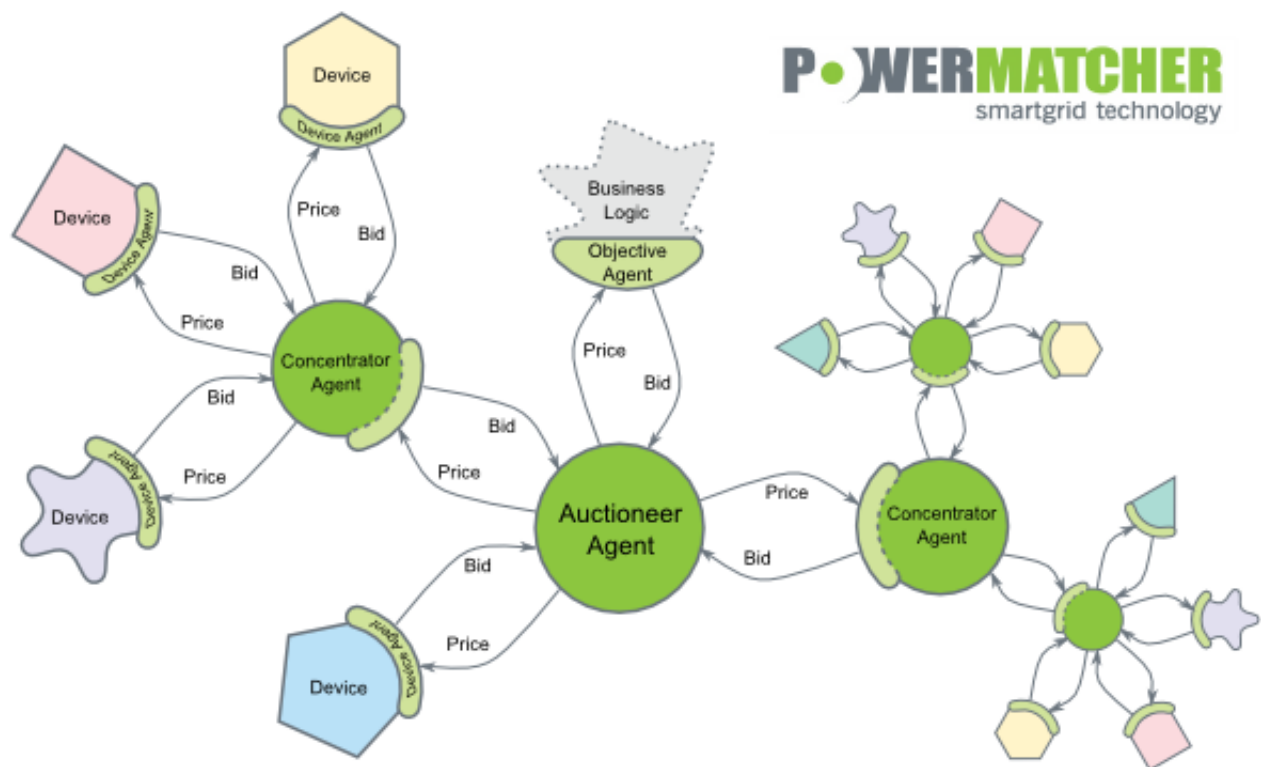
In figuur 1.33 wordt de structuur weergegeven met de verschillende agents.

Device agent (lokaal) functioneert als operator van het aangesloten toestel (diepvries, koelkast,..) en zorgt dat het toestel op een meest economische manier functioneert.

Concentrator agent bundelt de behoeftes van een aantal device agents en biedt ze aan aan de auctioneer agent die een prijs vastlegt en terugstuurt. De concentrator geeft de prijs door aan de device agents.

Auctioneer agent zorgt voor prijsvorming, verzamelt alle informatie tot één behoefte waarmee de prijs wordt onderhandeld met de leveranciers en brengt daarna de devices op de hoogte.

Objective agent is niet noodzakelijk voor de goede werking maar wordt gebruikt om restricties op te leggen binnen een cluster van het systeem door bvb. als Virtual Powerplant op bepaalde momenten het verbruik te beperken tot onder een vastgelegd niveau. Hij bereikt zijn doel door in te spelen op de prijsvorming. Als er geen objective agent actief is zal de cluster enkel zichzelf in evenwicht houden.



Figuur 1.33: Powermatcher agents

Opzet

In Hoogkerk, Groningen is een Powermatcher cluster opgezet met een groep huishoudens om de technologie te testen. In een eerste fase werden 25 huishoudens uitgerust met de nodige HEB (pv, microWKK, warmtepompen), slimme toestellen, meters en elektriciteits- en communicatieaansluitingen. Verder werden ze ook verbonden met windmolenpark Kreileroord. Daarna werd de Powermatcher-technologie gebruikt om het net stabiel te houden en optimaal te benutten door energie te verhandelen in deze interne markt op basis van realtime prijzen.

Met deze eerste fase is de technische haalbaarheid van het concept aangetoond en werd er door de deelnemers in het algemeen positief gereageerd. De implementatie is flexibel genoeg gebleken en gaf weinig comfortverlies aldus de bewoners. De resultaten tonen aan dat het gebruik van DER het systeem toelaat te reageren op wijzigende vraag in het net. Ook was het mogelijk om piekmomenten af te vlakken.

In een tweede fase, gestart in september 2011, wordt de groep deelnemers uitgebreid naar 40 gezinnen en 10 elektrische voertuigen en ligt de focus op de integratie met het verkoopproces en het businessmodel. Door gebruik te maken van twee nieuwe systemen gaat men enerzijds vraag en aanbod sturen op basis van wisselende prijzen binnen een dag. Anderzijds wil men zoveel mogelijk duurzame energie benutten.

Conclusie

De eerste fase toont aan dat het mogelijk is een smart grid met bijbehorend marktmodel op te zetten en efficiënt in te zetten om hernieuwbare energie maximaal te integreren.

Deelnemers kunnen via Powermatcher volautomatisch elektriciteit uitwisselen, zonder al te groot verlies aan comfort.

Indien het verbruik groter wordt dan de hernieuwbare productie wordt het systeem in balans gehouden door klassieke energiebronnen in combinatie met DSM.

Voor de DNB levert Powermatcher de mogelijkheid om pieken te verlagen en de netcapaciteit optimaal te benutten. Voor energieproducenten wordt het mogelijk om via het systeem te beschikken over vpp's. Powermatcher zal voor alle betrokken partijen een optimum te vinden.

Aan de andere kant is een interval van 15 minuten zeer kort om te anticiperen of alternatieven te vinden voor de nodige energie. Op langere termijn, gaande van week en weekend en zelfs seizoenen is het inschatten van energieprijzen zeer moeilijk.

Het systeem laat wel toe dat er niet-controleerbare gebruikers zijn, die voor onzekerheid zorgen. Het systeem moet met deze onzekerheid rekening houden en enige voorspelling van verbruik is nodig. Dit is evengoed het geval met de producenten (PV-panelen of windmolens). Verder is een grote aantal deelnemers nodig om het verbruik per kwartier af te vlakken. Toegepast op wijken of grotere groepen kan het systeem wel flexibel ingezet worden.

1.6.4 Linear

Het Linear-project (**L**ocal **I**ntelligent **N**etworks and **E**nergy **A**ctive **R**egions) streeft zowel naar een doorbraak op technologisch vlak als de effectieve uitvoering op gebied van DSM-technieken.

Linear is een samenwerking tussen vele verschillende partners, gaande van de academische wereld en onderzoeksgroepen over overheden, industriële spelers uit de verschillende sectoren (telecom, ICT, energie en witgoed,...). Dit maakt van het Linear project een zeer uitdagend maar interessant project.

Doel van het project

Het eerste onderzoeksopzet is het ontwikkelen van methodes om de nodige technologie op vlak van DSM uit te rollen.

Dit eerste luik is zeer breed opgevat en stelt om te beginnen verschillende gebruikers- en apparaatprofielen vast op basis van een uitgebreide monitoring campagne.

Daarna onderzocht men het energieverbruik en potentieel voor flexibiliteit bij zowel gebruikers als apparaten.

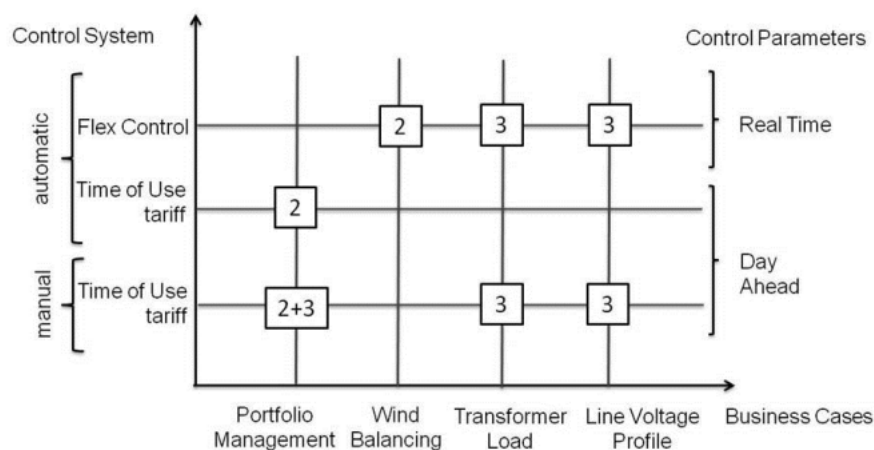
Verder wordt de combinatie van DER, zoals pv, met thermische en elektrische opslagmogelijkheden onderzocht, en wordt de invloed van toenemende DER op het netwerk bestudeerd.

Tot slot onderzoekt dit luik ook de mogelijke toepassing van elektrische voertuigen als last, opslag of producent.

Een tweede aspect is het effectief toepassen van de gevonden technologieën en methodes door het opzetten van een pilootproject in een residentiële omgeving. De informatie en kennis uit het eerste deel wordt dan gebruikt om een optimale combinatie te maken van lasten, opslag en productie en zo controlestrategieën te bepalen met behulp van simulaties en het ontwikkelen van regelalgoritmes. Deze resultaten worden gebruikt om de praktijktesten te ondersteunen zowel voor dit als andere projecten.

Door toenemende HEB verandert de markt en heeft heel wat invloed op zowel marktspelers als infrastructuur daarom heeft Linear de vier meestbelovende businesscases uit figuur 1.35 geïdentificeerd met hun controle strategie.

Een eerste controlestrategie is **manual ToU**, waarbij de gebruiker een dag op voorhand



Figuur 1.34: Linear businesscases en controlestrategieën

de prijzen tijdens vaste uren doorkrijgt en financieel beloond wordt om hun verbruik te verschuiven. Daarnaast is er ook **automatische ToU**, waarbij de apparaten zelf hun verbruik optimaliseren op basis van de tarieven.

Tot slot is er nog een **flexibele automatisch controle** waarbij er een cluster van huishoudens wordt gevormd, die hun netto verbruik/productie aanpassen door AD commando's die de slimme toestellen aansturen.

Via **Portfolio Management** probeert men residentiële klant te stimuleren zijn energieverbruik te verschuiven naar goedkopere dalmomenten. In de huidige markt krijgen residentiële klanten een tarief aangerekend dat gedurende maanden vrij constant is en de gemiddelde kost tijdens deze periode voorstelt.

Hoewel groothandelsprijzen variëren binnen een maand en zelfs dag heeft de residentiële klant geen enkele stimulans om verbruik te verschuiven naar dalmomenten, mede door gebrek aan slimme meter of real time prijzen.

Bij **Wind Balancing** zal een BRP de oncontroleerbare en onvoorspelbare energiebron in zijn portefeuille aanvullen met AD. Door onevenwicht te counteren met controleerbare, flexibele lasten uit een zone waar residentieel AD beschikbaar is.

Een volgende case is **transformatorveroudering**. Kan men door het afvlakken van piekbelastingen de levensduur verlengen en investeringen in grotere transfo's uit stellen? Laagspanningstransformatoren worden, in plaats van continu eerder cyclisch belast door piekverbruiken gedurende de dag. Dit cyclische belastingen heeft hogere temperaturen tot gevolg waardoor de transformator sneller veroudert. Ook hier kan AD helpen door pieken af te vlakken waardoor er een constantere belasting en temperatuur wordt bereikt.

Een laatste businesscase is **Line Voltage Profiles** die spanningsvariaties door HEB beter wil beheren. Oorspronkelijk werden in laagspanningscabines de spanningsniveaus ingesteld, rekeninghoudend met de aansluitingen die ze bedienen, waarbij de spanning binnen bepaalde grenswaardes moet blijven.

Door de komst van HEB is deze werkwijze moeilijker geworden en kan het spanningsniveau zelfs vastgelegde bovengrenzen overstijgen. Verder kunnen, door ongecoördineerd laden van meerdere elektrische voertuigen in dezelfde straat, ook ondergrenzen overschreden worden.

Opzet AD infrastructuur

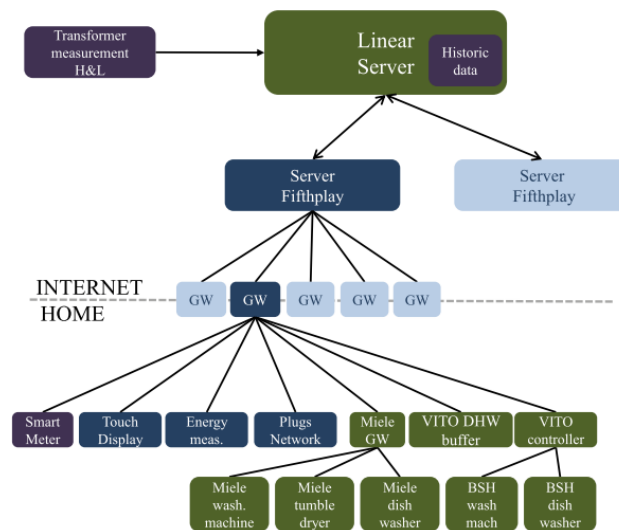
Zoals eerder aangehaald is het Linear project een samenwerking van heel wat partners. Figuur 1.34 geeft een overzicht van de gebruikte infrastructuur en toestellen. Er werd gebruik gemaakt van het EMS van Fifthplay en Miele@Home, die eerder al werden besproken. Een deel huishoudtoestellen zijn smartgrid ready op de markt verkrijgbaar, andere werden uitgerust met controllers die in huis of door partners zoals VITO werden ontwikkeld.

Voor de slimme meters is er verder gebouwd op een pilootproject van Infrax en Eandis. Beide hanteerden een aangepaste technologische aanpak.

Infrax baseerde zich op DSMR 4 standaard (Dutch Smart Meter Requirements) en werd er gebruik gemaakt van communicatie via een ethernetmodule en het kabelnetwerk of met een GPRS-module.

Eandis daarentegen werkt met een master-slave principe, waarbij enkele meters, de masters op één LS-kabel verbonden zijn met de centrale systemen, de overige meters sturen hun gegevens door naar een master via PLC. Voor een vlotte PLC-communicatie zijn er filters geplaatst op elk aansluitpunt.

Infrax opteerde voor een pull systeem om de gegevens elke 15 minuten door te sturen naar het centrale systeem, terwijl Eandis een push principe hanteert, waarbij de gegevens door het centrale systeem worden opgevraagd.



Figuur 1.35: Linear DSM infrastructuur
en

Voorlopige conclusies

Het Linear project loopt nog tot eind van 2014 en tegen december zullen de eindrapporten worden opgesteld. In april 2014 werd de kaap van 100.000 uren aangeboden flexibiliteit gerond. Dit resultaat, behaald met 185 gezinnen en meer dan 400 slimme apparaten toont aan dat flexibele energieverbruik bij gezinnen zeker potentieel biedt. Toch is het nodig dat de technologie verder op punt wordt gesteld maar worden volgende conclusies nu al worden getrokken:

- In het algemeen kan gesteld worden dat consumenten gemotiveerd kunnen worden om deel te nemen aan demand response zolang de geschikte modellen en stimuli aanwezig zijn. De huidige aanpak van de energiesector is te technologiegericht en te weinig klantgericht, hoewel de eindgebruiker de sleutel tot succes in handen heeft.
- Daarnaast kunnen de potentiële gebruikers niet als homogene groep worden gezien. Ze zijn ruwweg in te delen in 4 categorieën: aanhangers, tegenstanders, twijfelaars en weigeraars, waarbij inspanningen best wordt gefocust op de eerste twee groepen.
- Het betrekken van eindgebruikers in dsm en smart grids zal enkel slagen als ze een plug-and-play oplossing wordt aangeboden, die niet raakt aan hun comfort.
- Ook al beschikt men over een toepasselijke businesscase, moet er goed worden nagedacht over stimuli. In het Linearproject wordt er een combinatie van (financiële) beloningen gebruikt om gebruikers aan te zetten deel te nemen aan een overkoepelend energiebeheerssysteem.
- Het opzetten van een ingewikkeld en werkend systeem zoals smartgrid en DSM vraagt meer tijd, moeite en middelen dan de gemiddeld wordt besteed aan dit soort projecten. Het is ook zeer belangrijk in de beginfase voldoende tijd te besteden aan de opzet en noden van DSM-projecten.

1.7 Conclusies literatuurstudie

Zowel de industrie, overheid als wetenschappers onderkennen het potentieel van residentiële demand side management om lokale HE maximaal te integreren in het net door residentieel verbruik af te stemmen op lokale HE. DSM is een technologie die in de praktijk al werd toegepast in verschillende onderzoeken en projecten. De resultaten van deze projecten wijzen grotendeels uit dat DSM een (deel)oplossing kan zijn.

Momenteel geeft de industrie nog geen hoge prioriteit aan demand side management, mede door factoren die deze fabrikanten niet in de hand hebben, zoals infrastructuur of een wetgevend en technisch kader waarin zij deze technologie verder kunnen ontwikkelen of uitrollen.

De bestaande infrastructuur (communicatiemiddelen, smart meter uitrol,) en huidige regelgeving (nog geen ToU,) zorgen ervoor dat het voor de fabrikanten (en hun eindklanten) nog niet echt loont om voluit in te zetten op residentiële DSM.

Voor het moment ligt de focus vooral op hulpmiddelen die de eindgebruiker informeren over zijn energieverbruik. Onder het mom van “meten is weten” wordt via schermen, portalen en apps deze geregistreerde informatie beschikbaar voor de consument.

Een volgende stap zijn toepassingen, die zorgen voor een lokale optimalisatie (minimum energieverbruik, minimum energiekost, maximum comfort). Om hiermee van start te gaan, kan men in eerste instantie best enkel werken met het bestaande dag/nacht tarief. Het gebruik van dit soort nieuwe toepassingen is daarenboven momenteel enkel voor de *early adopters*.

Een voorbeeld hiervan is een nieuwe subsidieregeling in Duitsland voor gebruikers die pv-installaties combineren met batterijen. Daar hangt echter een voorwaarde aan. Men mag op elk moment slechts 60% van het piekvermogen van de pv-installatie terug leveren aan het net. Voor deze situatie is een lokale optimalisatie waarbij gestreefd wordt naar een hoge eigenconsumptie nuttig en voordelig.

De heterogene opbouw van het net, nationale wetgeving en infrastructuur doorheen Europa, zorgt voor bijkomende drempels met betrekking tot de grote doorbraak van residentiële DSM.

Aangaande standaardisatie is in februari 2014, OpenADR een internationale (pre-)standaard geworden: IEC PAS 62647-10-1. Dit soort ontwikkelingen van internationale standaarden bieden meer zekerheid en nodige voorwaarden voor interoperabiliteit en verdere ontplooiing van DSM.

Samengevat kan worden gesteld dat het ontwikkelproces van residentiële DSM start met de sensibilisering en bewustwording van eigen verbruik door klant.

Een ander punt is standaarden en regels vastleggen die voor interoperabiliteit van toestellen zorgt. Dit is voor de fabrikanten belangrijk bij investeringen in de ontwikkeling van slimme toestellen en controllers.

Verder is gebruiksgemak doorslaggevend voor de eindklant, die een eenvoudige plug-and-play oplossing wil, zonder veel kopzorgen of verlies aan comfort.

Voor de netbeheerders ligt de focus op het slimmer maken van het net door infrastructuurwerken, onder meer door de uitrol van slimme meters. Uit de gevoerde pilootprojecten blijkt het aanpassen van deze infrastructuur ter plaatse niet zo evident, en moet er zeker ingezet worden op een goede communicatie met de eindklant.

In de toekomst wordt de eindgebruiker als resident in de wereld van morgen een sleutelfiguur in de dienstverlening en services (zoals TOU, automated demand response,...) die horen bij residentieel DSM.

Hoofdstuk 2

Theorie

2.1 Inleiding

Vorig hoofdstuk schetste een overzicht van de werking van het elektriciteitsnet en de hoofdrolspelers erin. Daarna volgde een uiteenzetting over DSM met bestaande concepten en nieuwe evoluties. Dit hoofdstuk zal verdergaan met de theorie die gebruikt wordt in de, op te bouwen DSM-testinfrastructuur van i-NET. Deze theorie bestaat uit transformaties die gebruikt worden in de digitale regelschema's met omzettingen van driefasige naar tweefasige systemen en omgekeerd.

Verder wordt het principe van energiesturing tussen twee bronnen aangehaald. Dit laatste is nodig om tot een proefopstelling te komen waarbij energie van één net naar een ander net kan overgezet worden.

2.2 Transformaties

2.2.1 Inleiding [20]

"Equivalenten schemas per fase zijn op grote schaal gebruikt in steady-state analyse en ontwerp van AC-machines. Om de verschillende controleschemas van AC-machine drives te begrijpen en te analyseren, is een dynamisch model noodzakelijk. De belangrijke doorbraak in de analyse van de driefase AC-machines, was de ontwikkeling van de *reference frame theory*.

Met deze technieken is een transformatie van het apparaat naar een ander assenstelsel mogelijk. Door een verstandige keuze van het assenstelsel, is het mogelijk de complexiteit van het wiskundige machinemodel sterk te vereenvoudigen. Hoewel deze technieken oorspronkelijk ontwikkeld zijn voor de analyse en simulatie van AC-machines, zijn ze nu ook waardevolle tools in de digitale aansturing van deze motoren.

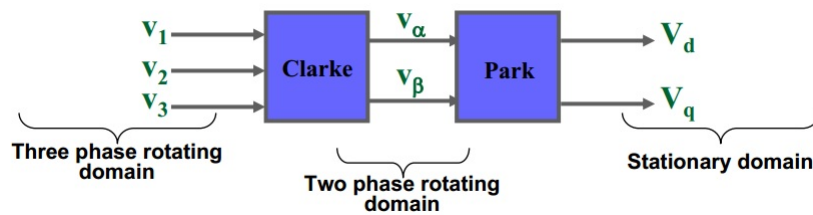
Wanneer digitale aanstuurtechnieken van AC-machines worden uitgebreid naar stroom, koppel en flux controle, is de behoefte aan compacte en nauwkeurige machine-modellen voor de hand liggend.

Het concept van vectorcontrole heeft een nieuwe mogelijkheid gecreëerd voor het aansturen van AC-machines met dynamische prestaties die minstens zo goed zijn als die van gelijkstroombmotoren. Het gedrag van AC-machines is gemakkelijker te beschrijven door de ontwikkeling van dynamische modelvergelijkingen in een roterend assenstelsel” [20].

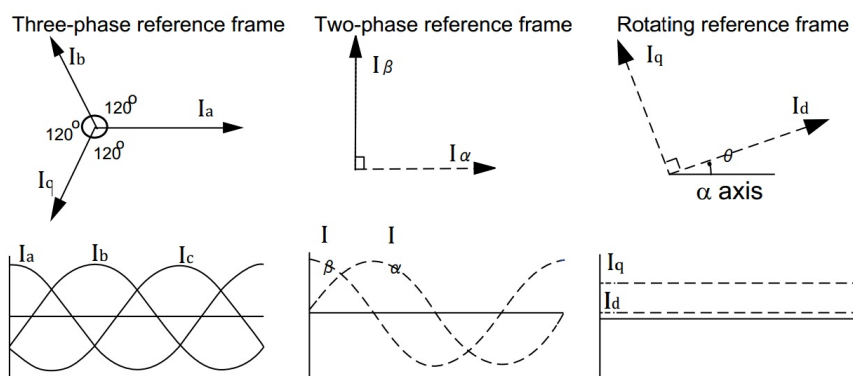
Het doel van dit hoofdstuk is om de basisbegrippen van de theorie over referentieassenstelsels te introduceren en toe te passen voor stroomsturing. Hierdoor is de werking van de modellen, gebruikt in de proefopstelling, makkelijker te begrijpen. Er wordt afgesloten met de theorie achter Space Vector Modulation (SVM) voor het opwekken van de wisselspanning vertrekkende van een DC-tussenspanning.

In de proefopstelling worden de transformaties gebruikt om op een eenvoudige manier een driefasig veld op te wekken dat synchroon draait met de netspanning. Onder de verschillende beschikbare transformatie methoden, zijn de bekende:

- Clarke-transformatie,
- Park-transformatie.



Figuur 2.1: Blokschema Clarke- en Park-transformatie[25]



Figuur 2.2: Assenstelsels[26]

Clarke- en Park-transformaties worden voornamelijk gebruikt in vectorbesturingsarchitecturen die samenhangen met permanentmagneet synchrone machines (PMSM) en asynchrone machines.

De drie assenstelsels aangegeven in figuur 2.1 geven een beeld van de twee transformaties[26]:

- 1 Driefasig assenstelsel waarbij I_a , I_b en I_c coplanaire eenheden zijn onder een hoek van 120°
- 2 Orthogonaal stationair assenstelsel, waarin I_α (langs α -as) en I_β (langs β -as) loodrecht op elkaar maar in hetzelfde vlak liggen als in het driefasig referentiekader.
- 3 Orthogonaal roterend assenstelsel, waarbij I_d een hoek θ (rotatiehoek) maakt met de α -as en I_q loodrecht op I_d staat volgens de q-as.

2.2.2 Clarke-transformatie

De theorie is toepasbaar voor zowel een evenwichtig als onevenwichtig systeem. Dit maakt het grote verschil met een fasor-voorstelling. Fasors worden gebruikt in een regime toestand en enkel voor een symmetrisch systeem. De Clarke-transformatie en Park-transformatie gaan verder en kunnen eveneens gebruikt worden voor een onevenwichtig en transiënt systeem. Dit maakt dat men deze ook kan gebruiken voor dynamische motorsturingen en in de proefopstelling voor dynamische stroomsturingen. Ook overgangsverschijnselen worden correct meegenomen.

Doel

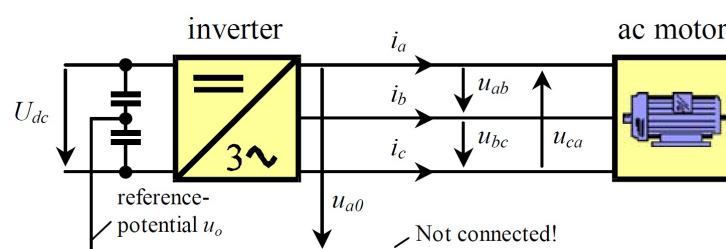
Hoewel de Clarke-transformatie vaak gebruikt wordt voor motorsturingen, wordt hij in de proefopstelling gebruikt om een driefasig systeem om te zetten naar een tweefasig systeem zonder verlies aan informatie.

Principe

”Door de Clarke-transformatie worden driefasige systemen getransformeerd van een driefasig assenstelsel naar een tweefasig orthogonaal stationair assenstelsel. Ze wordt voorgesteld door volgende vergelijkingen: In een driefase machine met geïsoleerd nulpunt (figuur 2.3), moet de som van de lijnspanningen en stromen nul zijn volgens de wet van Kirchhoff.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.1)$$

$$u_{ab} + u_{bc} + u_{ca} = 0 \quad (2.2)$$



Figuur 2.3: Driefase machine met geïsoleerd nulpunt[20]

Volgens vergelijkingen (2.1) en (2.2), wordt de ingang van de driefasige AC-machine volledig beschreven door twee lijnspanningen en twee stromen, gezien de derde waarde gelijk is aan de verschil van de twee vorige. Wanneer dus het dynamische gedrag van AC-machines beschreven wordt, kunnen de meerfasige windingen gereduceerd worden tot één paar windingen” [20].

In de proefopstelling in het labo wordt echter de uitgang van TVM aan een net gekoppeld met nulgeleider. De Clarke-transformatie met nulgeleider vormt driefase spanningen en stromen in abc coördinaten om naar $\alpha - \beta - 0$ coördinaten[21]:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

en

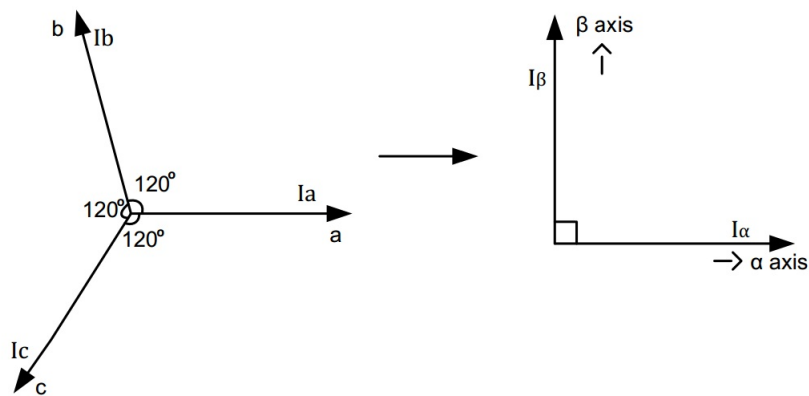
$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

waarbij[21]:

$P_0 = v_0 * i_0$ ogenblikkelijk homopolaire vermogen,

(v_0 en i_0 zijn niet noodzakelijk in fase)

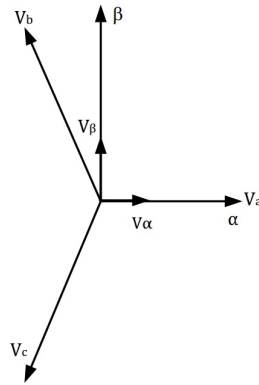
$P = v_\alpha * i_\alpha + v_\beta * i_\beta$ ogenblikkelijk vermogen



Figuur 2.4: Clarke-transformatie[26]

2.2.3 Inverse Clarke-transformatie

De transformatie van een twee-assig orthogonaal stationair assenstelsel in een driefasig stationair assenstelsel wordt bekomen door de inverse Clarke-transformatie zoals getoond in figuur



Figuur 2.5: Inverse Clarke-transformatie[26]

2.5. De inverse Clarke-transformatie wordt uitgedrukt door volgende vergelijkingen[26]:

$$V_a = V_\alpha \quad (2.5)$$

$$V_b = \frac{-V_\alpha + \sqrt{3} * V_\beta}{2} \quad (2.6)$$

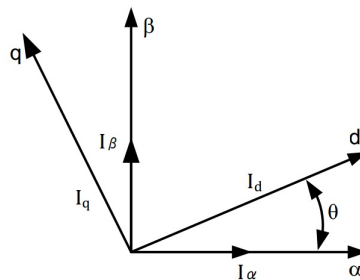
$$V_c = \frac{-V_\alpha - \sqrt{3} * V_\beta}{2} \quad (2.7)$$

waarbij:

V_a, V_b, V_c driefase eenheden zijn,

V_α, V_β stationaire orthogonale assenstelsteleenheden zijn.

2.2.4 Park-transformatie



Figuur 2.6: Park-transformatie[26]

Inleiding

Het d-q-assenstelsel wordt gekoppeld aan de grondharmonische (zeer dicht bij 50 Hz). De informatie over de grondharmonische wordt bekomen via een PI-controller. De werking van de PI-controller zorgt voor het uitfilteren van de harmonische componenten zodat enkel de grondharmonische overblijft.

Bij de transformatie zelf wordt de grondharmonische gebruikt als referentie maar de volledige informatie van het netsignaal blijft behouden. Binnen het d-q-assenstelsel kan het

netsignaal nog altijd variëren in grootte en hoek. Het resultaat na de transformatie bevat nog steeds alle informatie van het oorspronkelijke signaal (met uitzondering van de frequenties hoger dan de helft van de sample-frequentie:aliasing). De variabelen worden gerefereerd naar het fundamentele van het netsignaal.

Doel

Deze transformatie zet vectoren uit een twee-assig orthogonaal stationair assenstelsel om in een orthogonaal roterend assenstelsel.

Wanneer het gecreëerde assenstelsel even snel ronddraait als de aangelegde spanningen, kunnen statisch actieve en reactieve componenten van stroom en spanning gebruikt worden in de Simulinkmodellen.

Principe

De twee-assige orthogonaal stationaire assenstelselenheden worden omgezet in roterende assenstelselenheden met de Park-transformatie zoals getoond in figuur 4. De Park-transformatie wordt uitgedrukt door de volgende vergelijkingen[26]:

$$I_d = I_\alpha * \cos(\theta) + I_\beta * \sin(\theta) \quad (2.8)$$

$$I_q = I_\beta * \cos(\theta) - I_\alpha * \sin(\theta) \quad (2.9)$$

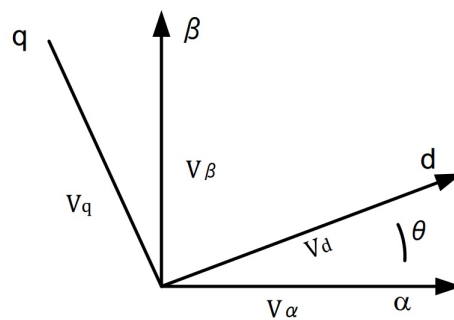
Waarbij:

I_d, I_q roterende assenstelselenheden zijn,

I_α, I_β orthogonaal stationaire assenstelselenheden zijn,

θ de rotatiehoek is.

2.2.5 Inverse Park-transformatie



Figuur 2.7: Inverse Park-transformatie[26]

De eenheden in een roterend assenstelsel worden getransformeerd naar een tweeassig orthogonaal stationair assenstelsel met de inverse Park-transformatie zoals getoond in figuur 2.7. De inverse Park-transformatie wordt uitgedrukt door de volgende vergelijkingen[26]:

$$V_\alpha = V_d * \cos(\theta) - V_q * \sin(\theta) \quad (2.10)$$

$$V_\beta = V_q * \cos(\theta) + V_d * \sin(\theta) \quad (2.11)$$

2.2.6 Space Vector Modulation [20][22]

”Net als de Clarke- en Park-transformatie is Space Vector Modulation (SVM) één van de essentiële delen uit het aanstuurmodel van de opstelling. ”Om een voeding voor AC-aandrijvingen met een variabele spanning en frequentie te bekomen wordt altijd gebruik gemaakt van een driefasige voltage source inverter (VSI) of spanningsinverter. Er zijn een aantal soorten PWM-regelingen om dit soort voedingen te verkrijgen. De meest gebruikte zijn de carrier-based sinusoidal PWM (SPWM) en spacevector PWM of SVM genaamd” [22].

PWM-technieken zoals SVM zijn speciaal ontwikkeld om akoestische ruis, harmonische inhoud van spanning en stroom en de daaruitvolgende flux- en koppelrimpel te minimaliseren. In dit eindwerk wordt SVM gebruikt voor het opwekken van de inverterspanningen via het Matlab model.

Bij het aansturen van de motor wordt de complexe referentiespanningsvector verwerkt als een geheel[20][22]. Deze complexe variabele is functie van de tijd in tegenstelling tot fasoren.

SVM wordt gebruikt om een referentiespanning te genereren waar een stroomregeling toegepast wordt in een roterend assenstelsel[22]. ”Zoals weergegeven in tabel 2.1 zijn er acht mogelijke combinaties van aan-uit schakelpatronen voor de drie bovenste invertertakken van de driefase inverter (tabel 2.1). De aan-uit- schakelstanden van de onderste schakelaars zijn tegengesteld aan de bovenste en ze worden dus volledig bepaald wanneer de bovenste invertertakken bekend zijn. De fasespanningen die overeenkomen met de acht schakelcombinaties kunnen in kaart gebracht worden door de α - β -transformaties zoals beschreven in hoofdstuk 2.2.2.

”Deze transformatie resulteert in zes spanningsvectoren en twee nulvectoren. De zes vectoren vormen de assen van een zeshoek met 6 compartimenten (S1-S6), zoals in figuur 2.10. De hoek tussen twee aangrenzende vectoren is 60° elektrisch. De nulvectoren bevinden zich in de oorsprong en zorgen voor een nulspanningsvector naar de motor. De afgeleide α/β spanningen wat betreft de DC-bus spanning U_{dc} worden samengevat in tabel 2.1” [20].

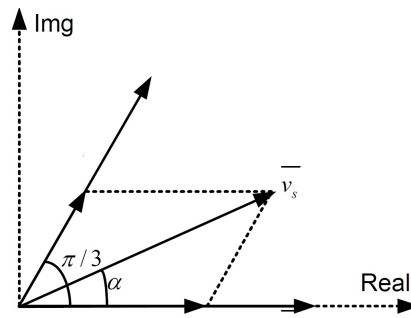
”Wanneer de gewenste uitgangsspanning drie sinusvormige fasespanningen zijn, elk 120° t.o.v. elkaar verschoven, dan wordt U_{ref} een ronddraaiende fasor met dezelfde frequentie en amplitude als de overeenkomstig gemiddelde fasespanningen.

Doel van de spacevector PWM techniek is de referentiespanningsfasor U_{ref} te benaderen door een combinatie van acht schakelpatronen. Praktisch worden alleen de twee aangrenzende toestanden (U_x en U_x+60) van de referentiespanningsvector en de nul-toestanden gebruikt worden, zoals blijkt uit het voorbeeld in figuur 2.10. De referentiespanning U_{ref} kan worden benaderd door de inverter in schakeltoestanden U_x en U_x+60 te zetten gedurende de respectievelijke duur t_1 en t_2 ” [20].

State	Switch no.			α/β -transformation of the states		
	S1	S3	S5	$U_{x,\alpha}$	$U_{x,\beta}$	$ \underline{U}_x $
000	OFF	OFF	OFF	0	0	0
100	ON	OFF	OFF	$2 U_{dc}/3$	0	$2 U_{dc}/3$
110	ON	ON	OFF	$U_{dc}/3$	$U_{dc}/\sqrt{3}$	$2 U_{dc}/3$
010	OFF	ON	OFF	$-U_{dc}/3$	$U_{dc}/\sqrt{3}$	$2 U_{dc}/3$
011	OFF	ON	ON	$-2 U_{dc}/3$	0	$2 U_{dc}/3$
001	OFF	OFF	ON	$-U_{dc}/3$	$-U_{dc}/\sqrt{3}$	$2 U_{dc}/3$
101	ON	OFF	ON	$U_{dc}/3$	$-U_{dc}/\sqrt{3}$	$2 U_{dc}/3$
111	ON	ON	ON	0	0	0

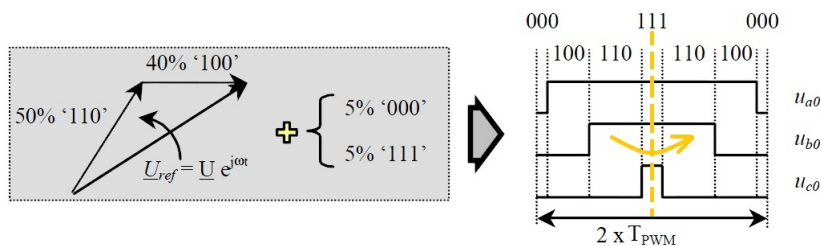
Tabel 2.1: Schakeltabel en α / β -transformatie van de toestanden[20]

$$\vec{U}_{ref} = \frac{1}{T_{PWM}}(t_1 * \vec{U}_x + t_2 * \vec{U}_x + t_0 * U_0) \quad (2.12)$$



Figuur 2.8: Principe van space vector tijdsberekening [22]

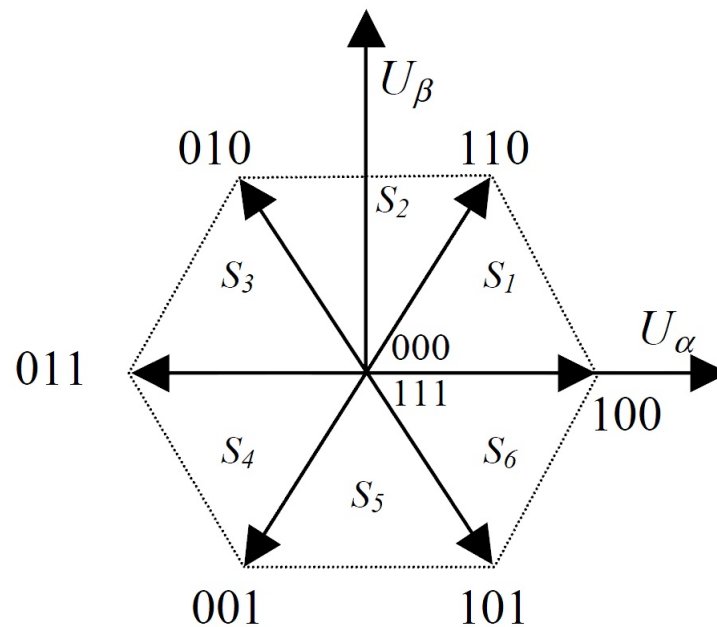
”Natuurlijk moet de aangesloten sector eerst gekend zijn. Aangezien de som van t_1 en t_2 minder dan of gelijk is aan T_{PWM} , moet de omvormer in de nulstand staan voor de rest van de periode” [20]. De resterende tijd t_0 wordt evenredig verdeeld over beide nulspanningsvectoren (figuur 2.9). Het rechterdeel van figuur 2.9 komt overeen met 2 keer T_{pwm} . De 2^{de} periode wordt bekomen door de eerste te spiegelen rond de as in het midden van nulvector met toestand 111.



Figuur 2.9: Voorbeeld van duty-cycle generation[20]

$$t_0 = T_{PWM} - t_1 - t_2 \quad (2.13)$$

Zoals getoond in de eerste kolom van tabel 2.1 worden alle toestandsveranderingen bekomen door in elke toestand maar één inverterbeeen te schakelen. De spiegeling van de patronen en eenmaal schakelen tijdens elke periode zorgen voor minder harmonische vervorming.



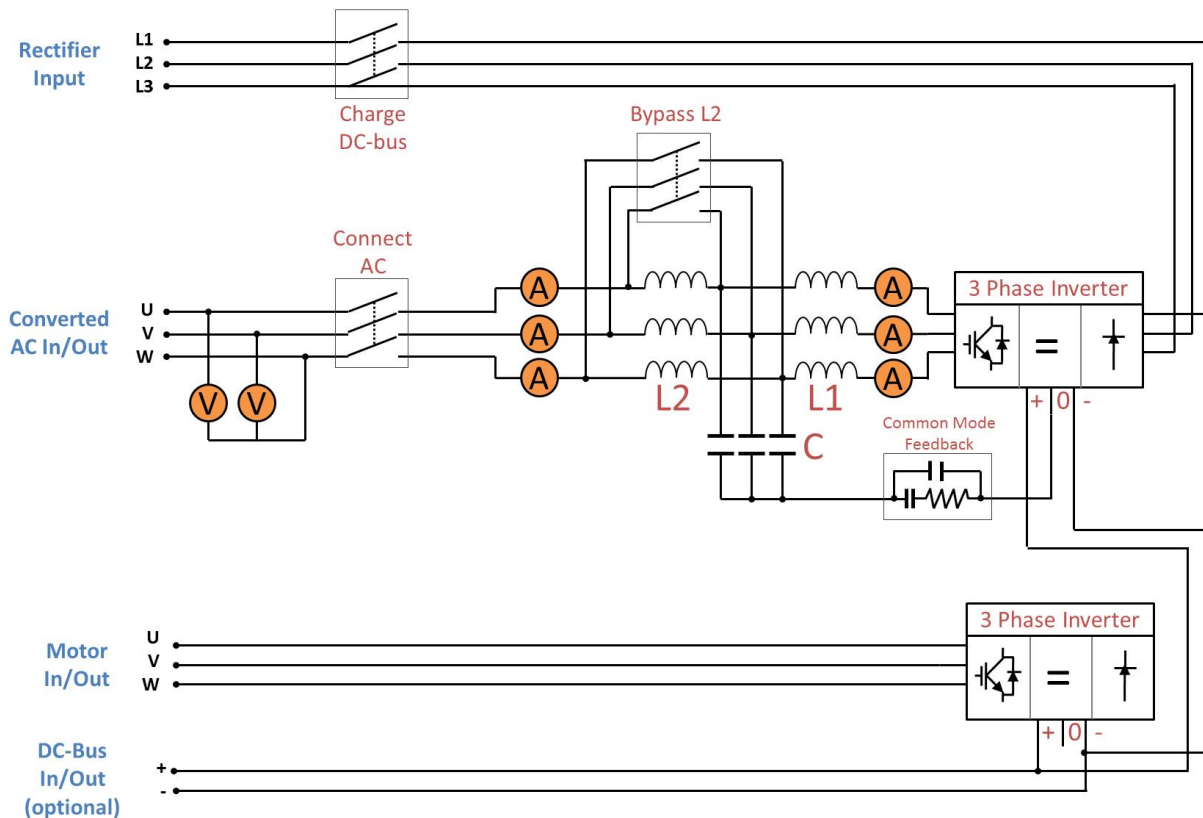
Figuur 2.10: Zeshoek, gevormd door basis spacevectoren en sector definiëring (S1-S6)

Zoals hierboven vermeld, is de referentiespanning in feite gelijk aan de gewenste driefasige uitgangsspanningen toegewezen aan het α / β assenstelsel. De omhulling van de zeshoek, gevormd door de basis ruimtevectoren, zoals getoond in figuur 2.10, geeft de waarde van de maximale uitgangsspanning. Omdat in de opstelling gewerkt wordt men een nulgeleider (zie bijlage A aansluiting met 'N'), is er geen winst t.o.v. SPWM. De DC-tussenspanning moet ook hoger zijn dan voor de standaard PWM. Daarom is de gelijkgerichte spanning van het net niet voldoende maar moet de DC-spanning 15 % hoger zijn. De DC-spanning moet dus 15% hoger zijn dan wat men bekomt met een gewone gelijkrichter ($566V \cdot 1,15 = 650 V$). Het model zal daarom streven naar een DC-spanning van 700V.

2.3 Energiesturing

2.3.1 Inleiding

Figuur 2.11 toont een vereenvoudigde versie van het schema in de bijlagen met de inhoud van de Triphase Vermogen Module (TVM). Dit toestel kan vermogen sturen tussen netten en maakt deel uit van de proefopstelling bij i-NET om later eventueel DSM op te testen. In de TVM bevinden zich twee spoelen en een condensator (filtering). Als onderdeel van de theorie wordt hier ingegaan op de spoelen omdat deze deelvormen van de vermogenregeling tussen twee netten.

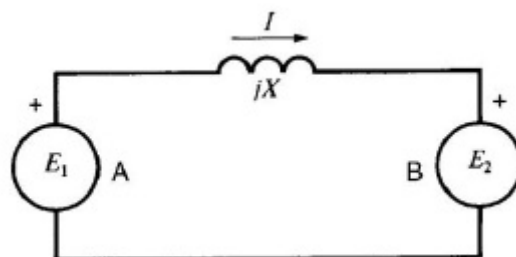


<http://portal.triphase.be/product/concept/F30M30.png>

Figuur 2.11: Vereenvoudigd schema TVM

2.3.2 Actief en reactief vermogen

”Vermogen sturen tussen twee bronnen zoals in figuur 2.12 komt voor bij studie over generatoren, synchrone motoren en transmissielijnen. In zulke circuits wordt actief vermogen van bron A naar bron B overgebracht of vice versa. De vermogensturing gebeurt via het regelen van de amplitude. De voorrijlende bron zal het actief vermogen leveren”[27]. In de proefopstelling met TVM maken we hiervan gebruik om vermogen te sturen van het net naar de TVM of omgekeerd.



Figuur 2.12: Vermogen sturen tussen twee bronnen [27]

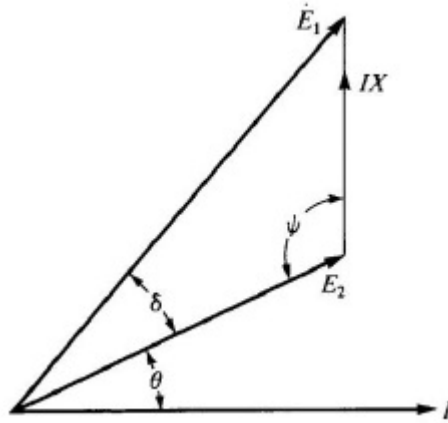
$$P = \frac{E_1 * E_2}{X} * \sin(\delta) \quad (2.14)$$

”Bij toepassen van de wet van Kirchhoff bekomen we volgende vergelijking :

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_2 + j \vec{I} X \quad (2.15)$$

Als we veronderstellen dat I naijlt op E2 met een arbitraire hoek en E1 voorijlt op E2 met een hoek δ , bekomen we het fasediagram van figuur 2.13. Vector IX ijlt in het ideaal geval 90° voor op I. Het door B opgenomen actieve vermogen is” [27]:

$$P = E2 * I * \cos(\theta) \quad (2.16)$$



Figuur 2.13: Fasediagram met actief vermogen opgenomen door bron B [27]

”Door toepassen van de sinusregel voor driehoeken krijgen we:

$$\frac{IX}{\sin(\delta)} = \frac{E1}{\sin(\Psi)} = \frac{E1}{\sin(90^\circ + \theta)} = \frac{E1}{\cos(\theta)} \quad (2.17)$$

Na omvorming geeft dit:

$$I * \cos(\theta) = \frac{E1 * \sin(\delta)}{X} \quad (2.18)$$

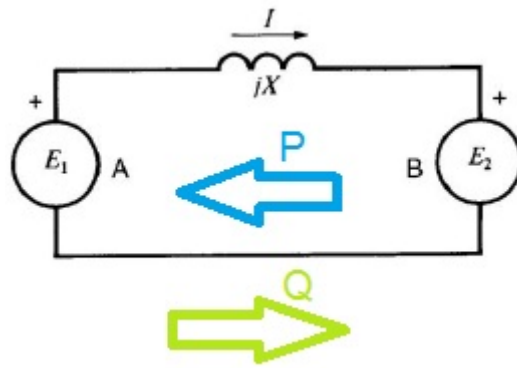
Na substitutie met vergelijking (2.16) geeft dit” [27]:

$$P = \frac{E1 * E2}{X} * \sin(\delta) \quad (2.19)$$

”Het actieve vermogen P ontvangen door bron B is gelijk aan het geleverde actief vermogen van A. Het vermogen P wordt bepaald door de hoek tussen E1 en E2; de hoek tussen E2 en I moet niet gespecificeerd zijn of m.a.w. de spoel (zuiver) verbruikt geen actieve energie.

De ene bron verbruikt wat de andere opwekt.

Wanneer E_2 voorijlt op E_1 en de amplitude van E_2 kleiner is dan die van E_1 zal actief vermogen vloeien in de richting van E_1 en reactief vermogen van E_1 naar E_2 (zie figuur 2.14)” [27].



Figuur 2.14: Actief (P) en reactief (Q) vermogen tussen twee bronnen [27]

”Overdracht van reactief vermogen hangt af van de spanningsamplitudes. Het vertrekt van de bron met de hoogste spanningsamplitude en gaat naar de bron met de laagste spanningsamplitude.

Dus door de uitgangsspanning van de inverter (E_1) in fase te houden met de uitgangsspanning van E_2 , kan reactieve energioverdracht geregeld worden door de uitgangsspanningsamplitude van de inverter te veranderen.

In de praktijk is een kleine hoek tussen de spanningen nodig om de spanningsverliezen over de spoelen, veroorzaakt door de parasitaire weerstanden, te compenseren en de DC-bus spanning op een constante waarde te houden” [23]. In formule:

$$Q = \frac{E_1 * E_2 * \cos - E_2^2(\delta)}{X} \quad (2.20)$$

2.3.3 Regeling over de spoel

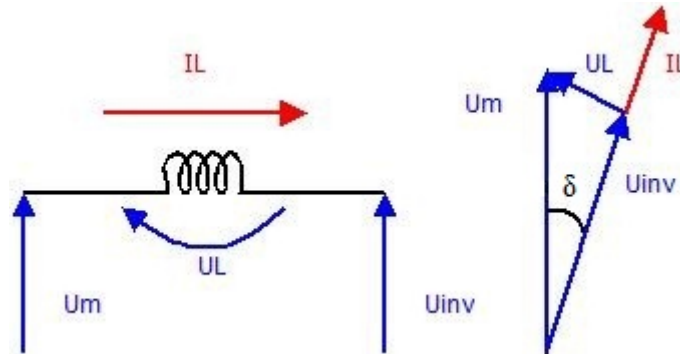
Wat volgt is gebaseerd op de theorie, vermogen sturen tussen twee bronnen (figuur 2.12). Aan de basis van de regeling ligt de volgende formule [27]:

$$P = \frac{E_1 * E_2}{X} * \sin(\delta) \quad (2.21)$$

De parameters E_1 en E_2 vindt u terug in figuur 2.12.

Parameter δ is afhankelijk van de stroom door de inwendige spoelen van de TVM. Men kan de stroom door de inwendige spoelen van de TVM regelen en dus onrechtstreeks de spanning over de spoelen.

De spanning U_m is de vectoriële som van U_L en U_{inv} . In formules:



Figuur 2.15: Aanpassen van de hoek δ met spanningsregeling over de spoel

$$\vec{U}_m = \vec{U}_L + \vec{U}_{inv} \quad (2.22)$$

Er wordt hier gewerkt in het d-q assenstelsel. U_m (netspanning) is gegeven en U_{inv} wordt geregeld. De hoek tussen beiden zorgt voor de nodige spanning. De grootte van U_{inv} (groter of kleiner) geeft de mogelijkheid om de reactieve component te regelen. Deze regeling kan reeds gebeuren zonder belasting van de DC-spanning en maakt ook deel uit van het regelschema.

2.4 Slotwoord

De transformaties die aan bod kwamen in dit hoofdstuk komen terug in het regelschema in bijlage B. Dat schema is gebruikt bij de proefopstelling en wordt uitgelegd in hoofdstuk 3. De energiesturing komt terug bij elk opstellingsconcept en elke meting die uitgevoerd werd.

Hoofdstuk 3

TVM-Proefopstelling

3.1 Inleiding

In hoofdstuk 2 werd theoretisch uitgelegd hoe, tussen twee gekoppelde netten, energie gestuurd kan worden. De uitvoering hiervan is ook meteen het doel van de proefopstelling. Wanneer deze volledig klaar is, kan men de invloed van de energiestroom op het net bestuderen. Daarna kan men eventueel DSM toepassen en de invloed vergelijken.

In dit hoofdstuk wordt stap voor stap uitgelegd hoe de netkoppling praktisch bereikt wordt. De eerste stap is uitleg over hoe de TVM is opgebouwd waarna overgegaan wordt naar de opstelling zelf.

Het origineel concept om vermogen te sturen tussen twee netten, bestaat uit een opstelling met twee TVM's. Deze kunnen gekoppeld worden via een DC-bus. De eerste TVM zorgt dan dat deze op peil gehouden wordt, terwijl de tweede energie uit de DC-bus naar een ander net stuurt. Uit testen blijkt dat er van dit concept moet worden afgeweken en er overgegaan moet worden naar een alternatief.

3.2 Onderdelen & componenten

Er zijn in het labo van i-NET twee TVM's beschikbaar. Deze modules zijn programmeerbare vermogenomvormers die bidirectionele energiestromen beheren tussen twee netten. Aan de ene kant het te testen net, daarnaast het hoofdnet. Dit is een van de mogelijkheden. Daarnaast kan men echter denken aan andere toepassingen als motorsturingen, PV-invertor, actief filter, enz... .

De meest gebruikte toepassingen van TVM's zijn:

- ★ actieve filter
- ★ active frontend
- ★ virtuele synchrone generator

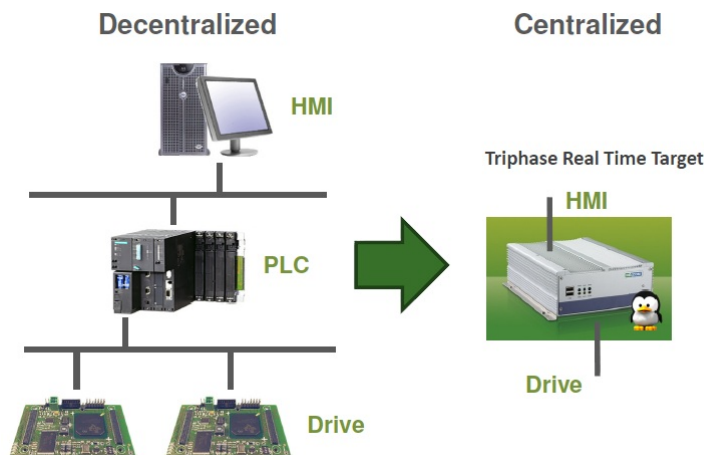
3.2.1 Systeem overzicht [24]

De opstelling bestaat uit vijf delen; RTT, Powermodules, digitale & analoge metingen, de engineering pc en software:

Real-time Target of RTT

”De RTT ligt in het hart van de Triphase besturingsarchitectuur die gecentraliseerde sturing toestaat over meerdere, gesynchroniseerde vermogen trappen en maakt monitoring en coördinatie mogelijk. Alle DSP, PLC, veldbus en de userinterface functionaliteit zijn geïntegreerd in een enkele verwerkingseenheid, zodat meteen nieuwe functies en veranderingen getest kunnen worden. De belangrijkste functies van de RTT zijn:

- real-time uitvoering van Simulink modellen via een geoptimaliseerde real-time kernel;
- volledige controle over de Power Modules, met directe toegang tot PWM's en metingen;
- tools voor real-time monitoring, parametertuning en datalogging



Figuur 3.1: Functies RTT

Powermodules

Powermodules zijn programmeerbare, herconfigureerbare eenheden. Ze worden gebruikt voor onderzoek, ontwikkeling en testopstellingen van vermogentoeepassingen. De open interface van de modules maakt real-time spanning- en stroomsturing mogelijk op basis van een Simulink schema. De modules kunnen AC/DC, DC/DC en motoraandrijvingen combineren. De uitvoering in het labo is een 15 kW versie.

Digitale & analoge metingen

3PExpress ondersteund het EtherCAT fieldbus protocol:

- breed scala van digitale en analoge I/O,
- flexibel, modulair en eenvoudig vervangbaar,
- volledig geïntegreerd in Matlab/Simulink.

Engineering pc

De engineering pc maakt verbinding met de RTT en wordt verder gebruikt om Matlab Simulink modellen te bouwen, compileren en over te zetten op de RTT. Verder worden via de engineering pc modellen gestart, gestopt en gecontroleerd of worden real-time instellingen aangepast. Daarnaast dient dit toestel ook voor signaal monitoring, weergave en opslag in real-time.

Software

Tot slot bestaat er een Simulink gebaseerde engineering interface van Triphase om stuuralgoritmes te creëren en aan te passen aan het gedrag van de Powermodules. Besturingsalgoritmes kunnen nieuw worden geprogrammeerd of opgebouwd met bouwstenen uit de spannings- en stroombesturingstoolbox. De Triphase toolbox werd geïnstalleerd en gebruikt. Er werden in deze thesis geen nieuwe algoritmes opgebouwd, enkel aangepast ” [24].

3.3 Opstelling

3.3.1 Inleiding

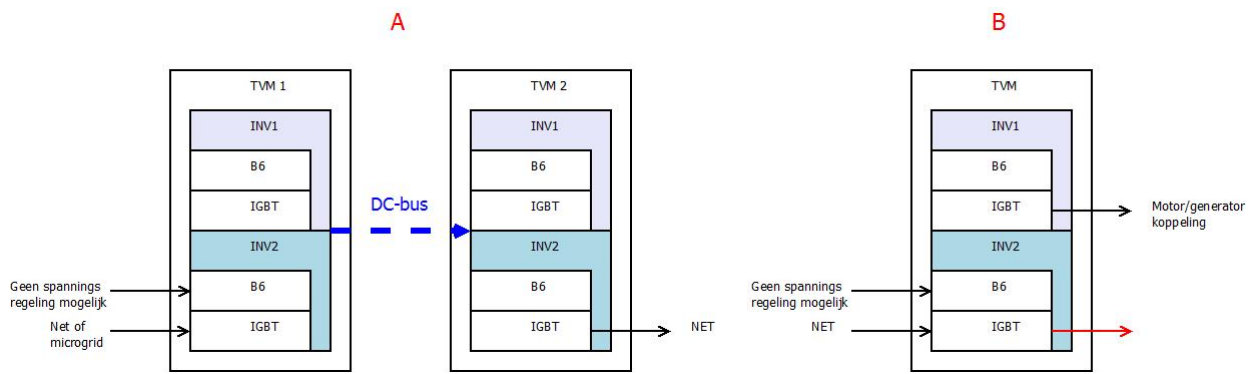
De twee TVM's zijn nodig om stabiel vermogen tussen twee netten te sturen. De eerste wordt gebruikt om de DC-bus op te laden en de tweede om het gewenste vermogenprofiel aan te sturen.

In beide gevallen wordt gebruik gemaakt van regelingen over de interne spoelen van de TVM's (Hoofdstuk 2 punt 2.3). Bij TVM1 voor het opladen van de DC-bus en bij TVM2 voor het aansturen met een stroomprofiel.

De hoek δ , ook in hoofdstuk 2 aangehaald om vermogen te sturen over de spoel, kan geregeld worden via de inverter. TVM 1 (figuur 3.2 A) zal de DC-bus op peil houden terwijl TVM2 zorgt voor het regelen van het actief vermogen. Beide TVM's zijn uiteraard door de DC-bus gekoppeld. De DC-bus spanning staat bij TVM1 ingesteld op 700V. De uitgang van de inverter van TVM2 moet 400V kunnen blijven leveren. De DC-bus dient hiervoor op niveau gehouden te worden. Er zijn twee mogelijkheden (figuur 3.2):

- Via de B6 brug van TVM 1
- Via het inverter gedeelte met IGBT's van TVM 1

Met een rechtstreekse net- of micro-grid koppeling via de B6 brug van inverter (figuur 3.2 A) kan geen spanningsregeling plaatsvinden. Met de regeling over de spoel met daarachter de IGBT's van de inverter kan er wel geregeld worden. Figuur 3.2B toont een alternatieve opstelling met één TVM. Wanneer de IGBT's van inverter2 gebruikt worden voor de regeling om stroom uit het net te trekken, kan deze niet meer gebruikt worden om ook terug uit te sturen. Via de IGBT's van inverter1 (zonder spoel regeling) wordt later alternatieve oplossing voorgesteld met motor/generator koppeling (punt 3.4). Om het verschil in stromen afkomstig



Figuur 3.2: Mogelijkheden opladen DC-bus

van het net via B6 brug en IGBT's te verklaren wordt hierop verder ingegaan in hoofdstuk 4 paragraaf 4.2.

3.3.2 Origineel concept

De beschrijving van het werkingsprincipe dat volgt, geldt voor een opstelling met twee TVM's. Dit was het oorspronkelijke doel maar kon om een aantal redenen niet worden uitgevoerd.

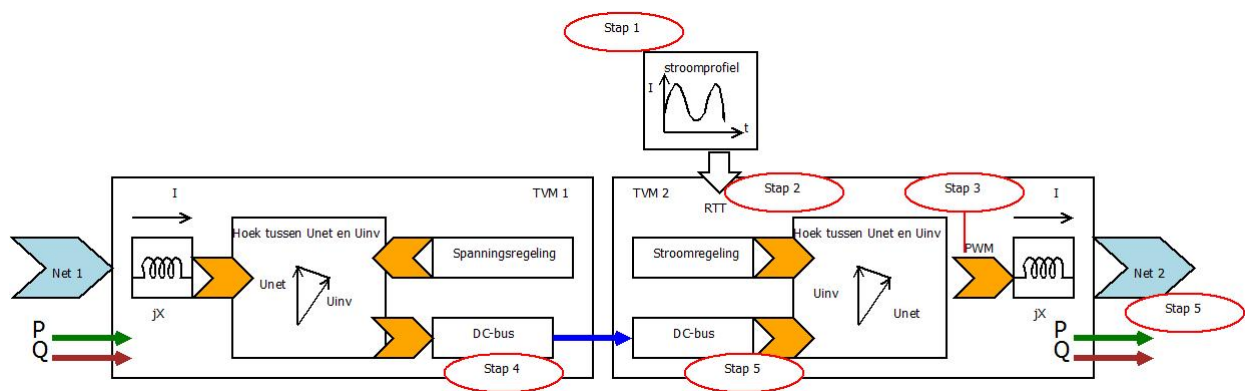
Stap 1 Profiel met op te nemen vermogen in tijd wordt aangeboden aan model in de RTT.

Stap 2 RTT berekent de nodige spanningen en de fasehoek.

Stap 3 Op basis van RTT worden gegevens gegenereerd. De powermodule stuurt het juiste PWM signaal om de gewenste energiestroom te creëren.

Stap 4 TVM1 zorgt dat de DC-bus op niveau blijft (700V) door energie uit het 1^{ste} net te halen.

Stap 5 TVM2 zorgt dat de energie, overeenstemmend met het profiel uit de DC-bus wordt gehaald en in het 2^{de} net terecht komt.



Figuur 3.3: Overzichtsschema werkingsprincipe met twee TVM's

3.3.3 Wijziging origineel concept

Uit een test blijkt dat de twee TVM modules niet gekoppeld kunnen worden omdat de differentieel afvalt op het moment dat de koppeling ingeschakeld wordt. Het probleem zit bij resonanties van beide spoelen (combinatie van TVM1 en TVM2), die een grote stroom veroorzaken.

Uit vergadering met Triphase blijkt dat dit opgelost kan worden door het plaatsen van een extra scheidingstransformator (kostprijs ± 3000 euro) tussen de uitgang van TVM2 en het net waar men energie aan wil leveren.

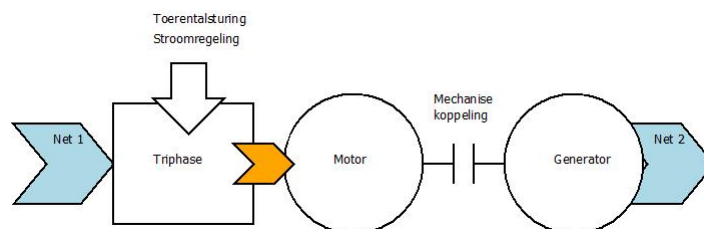
Een tweede reden waarom niet met de twee TVM modules kan gewerkt worden is omdat het aanstuurmodel 'PM15F30M30C' niet de mogelijkheid bezit om een actieve stroomcomponent ' I_d ' te sturen. Zelfs wanneer men de scheidingstransfo zou hebben, is een ander Simulinkmodel nodig.

3.4 Alternatieve oplossing met motor/generator koppeling

3.4.1 Inleiding

Als alternatief voor de netkoppelingen met twee TVM's, kan een motor/generatorkoppeling gebruikt worden om actieve energie terug op het net te zetten. Bij deze opstelling maken we gebruik van één TVM en twee netten. De generator hangt aan een ander net dan de TVM. Een motor/generator koppeling biedt volgende voordelen:

- het LCL-netwerk zorgt voor de nodige filtering.
- galvanische scheiding (geen elektrische verbinding tussen motor en generator).



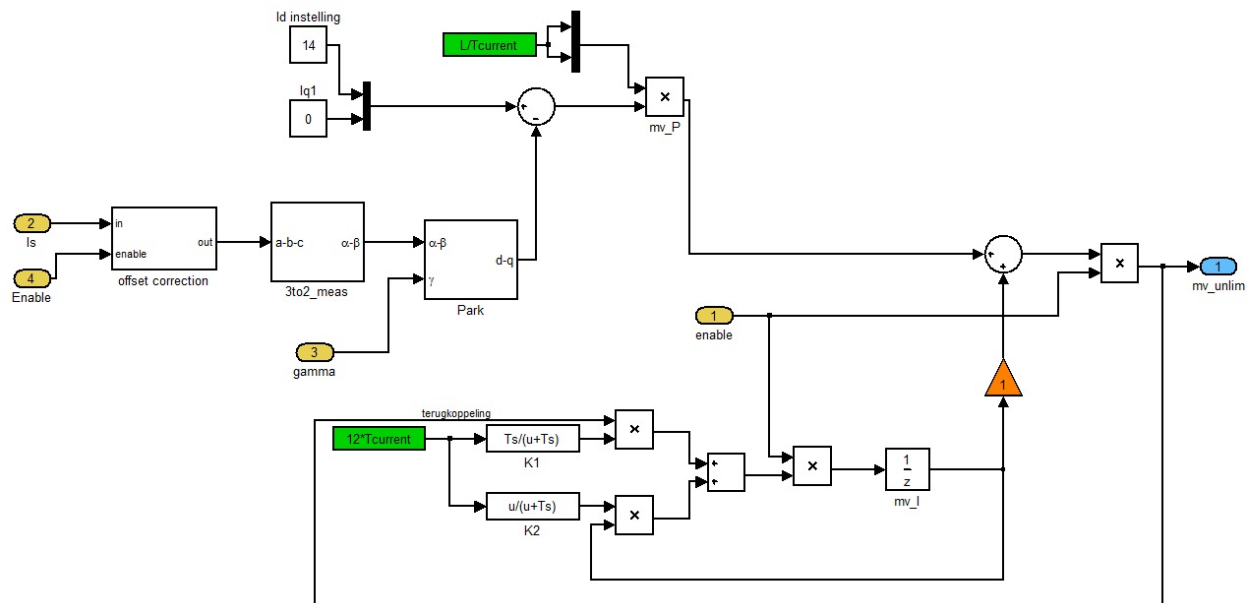
Figuur 3.4: Motor-generator koppeling

3.4.2 Werking regelschema

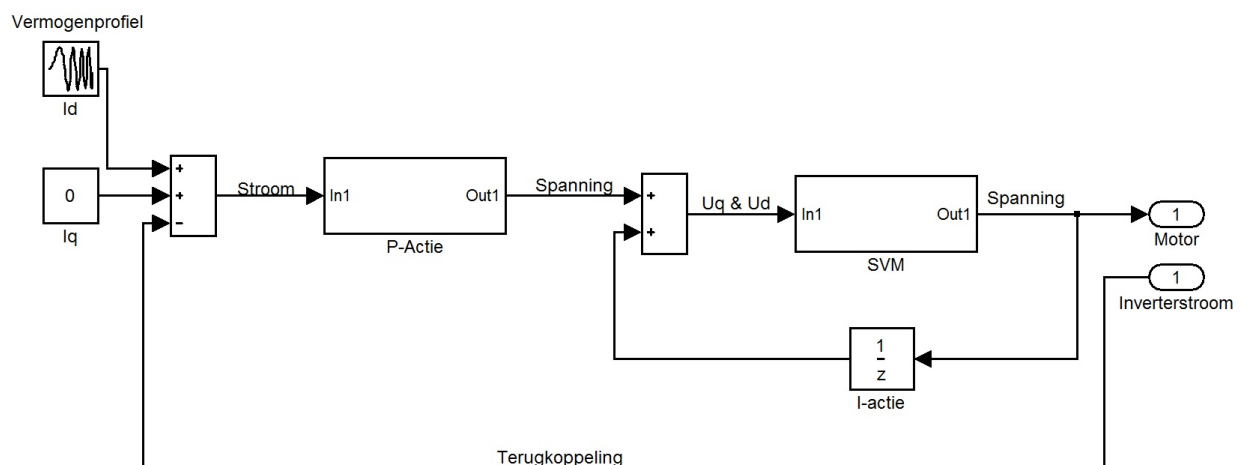
Figuur 3.5 toont het stroomregelschema zoals het aanwezig is in het originele model. Het actief (I_d) en reactief gedeelte (I_q) van de stroom kunnen ingesteld worden. Het stroomsignaal van de inverter (I_s) wordt omgezet in een d- en q-component en afgetrokken van het gewenste stroomsignaal. Dit samengestelde signaal wordt vermenigvuldigd met een parameter uit het model ($L/T_{current}$). De eenheid van dit signaal is Volt/Ampère waardoor men een uitgangssignaal in Volt bekomt aan de uitgang (P-actie). $12 \cdot T_{current}$ is ook een parameter afkomstig uit de parameterlijst die gebruikt is bij het laden van het model (Appendices B.2). Na invullen van deze parameter in de daarop volgende functie (waar tijd gedeeld wordt door tijd) bekomt men een eenheidsloze factor. Die factor bevat ook het uitgangssignaal dat een tijdswaarde vertraagd is (integratie). Het enable signaal zorgt ervoor dat de integratie actie gereset wordt wanneer het model (Appendices B.2) uitschakelt. Het voorkomt zo dat de integratielus oneindig blijft oplopen. Men bekomt uiteindelijk een d-q-signaal in Volt uit aan de uitgang.

Figuur 3.6 toont de vereenvoudigde versie van het regelschema met hetzelfde werkingsprincipe. De ingang I_d wordt vervangen door het gewenste vermogenprofiel.

Zoals te zien in de figuren 3.5 en 3.6 is er geen rechtstreekse terugkoppeling voorzien van volgende parameters:



Figuur 3.5: Originele regelkring met stroomsturing



Figuur 3.6: Vereenvoudigde regelkring met stroomsturing

- toerental
- spanning
- flux
- slip

Het regelschema (figuur 3.5) maakt geen gebruik van U/f controle of Field Oriented Control in zijn gehele vorm.

U/f regeling

”Het elektromagnetisch kippkoppel is evenredig met het kwadraat van de spanning-frequentie verhouding en het koppel is evenredig met de flux (U/f) en de stroom. Bij constant houden van frequentie en daarmee de motor snelheid, kan het kippkoppel variëren met het kwadraat

van de aangelegde spanning. Een verandering van de verhouding tussen spanning en frequentie veroorzaakt ook een verandering van de statorflux of de integraal van de emk van de stator. Deze integraal wordt bepaald door de flux van de rotor die een emk opwekt in de stator. Bij verwaarlozing van de resistieve spanningsval, is in regimetoestand de flux Ψ (piekwaarde) evenredig met de fasespanning U_1 (effectief) en de frequentie.

Sterke vermindering van de netfrequentie en aanhouden van nominale motorspanningen veroorzaakt verzadiging van de machine, alsook overdreven statorstroom. Daarom zou een verandering in frequentie gepaard moeten gaan met een overeenkomstige variatie van de statorspanning. Om het koppel van de inductiemachine te behouden, dient de spanning en de frequentie gevarieerd te worden in dezelfde verhouding. Bij verandering van de slip zal eveneens het koppel veranderen. Bij U/f is er geen koppelregeling mogelijk. Het koppel wordt bepaald door de belasting. U/f regelt enkel het toerental.

U/f regeling wordt gebruikt om het magnetisch veld bij verschillende toerentallen constant te houden” [20].

$$U_{tot} = 4,44 * n * \phi * f$$

waarbij:

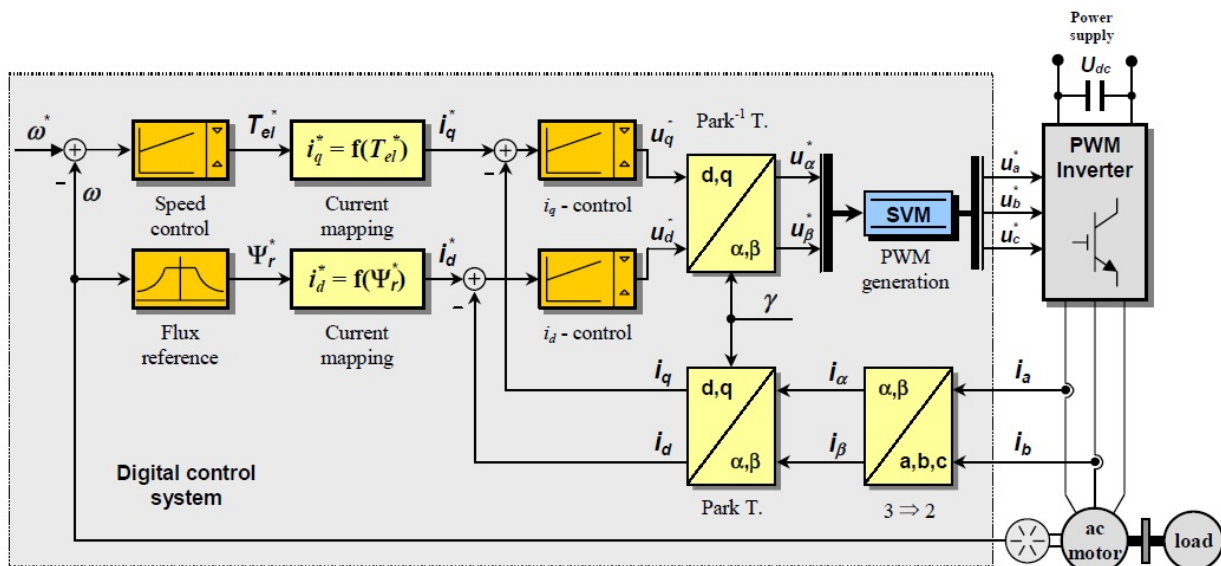
- U_{tot} = de totale spanning
- n = het aantal windingen
- ϕ = de flux
- f = de frequentie

Field Oriented Control

Figuur 3.7 toont het basis snelheidsregelschema voor een AC motorsturing met Field Oriented Control (FOC). ”Het doel van FOC is om de amplitude van de rotorflux-doorstroming ' Ψ_r ' constant te houden, behalve in het veldverzwakkingsgebied of bij flux-optimalisatie, en enkel de koppelproducerende stroom te wijzigen om het koppel van de AC machine te regelen. Uitgaande van een volledige ontkoppeling van het koppel en de flux, bekomt men een lineair verband tussen het elektromagnetisch koppel T_{el} en de koppel producerende stroom i_q . Het koppel in de AC machine kan als volgt worden uitgedrukt” [20]:

$$T_{el} = c * \Psi_r * i_q$$

”Zo kan het elektromagnetisch koppel door de motor worden geregeld door het regelen van de q-as stroom. In de snelheidsregeling wordt de koppelreferentie ' T_{el} ' berekend door een snelheidsregelaar. De rotorflux kan rechtstreeks geregeld worden door de d-as stroom” [20].



Figuur 3.7: Basis snelheidsregelschema voor ac-motorsturingen [20]

De regeling

Het gebruikte regelschema in figuur 3.5, is een afgeslankte versie zonder terugkoppeling van het toerental. Daardoor valt niet te bepalen of het ingestelde toerental (figuur B.2 in bijlage) ook werkelijk bereikt wordt. Zonder terugkoppeling van toerental is ook de slip niet te bepalen, daarover later meer in punt 3.4.3.

De stroom die via de inverter naar de motor vloeit wordt gemeten en omgevormd. Via de Park- en Clarke-transformatie (hoofdstuk 2) wordt de inverterstroom 'Is' omgezet naar d-q-assenstelsel en wordt dan gebruikt als terugkoppeling.

De meeste huishoudens nemen in vergelijking met industrie quasi zuivere actieve vermogens op. In de proefopstelling is dan enkel de actieve stroomcomponent gewenst omdat deze overeenkomt met het soort profiel dat men wenst af te spelen. In figuur 3.5 is daarom de stroom 'Iq1' ingesteld op '0' en heeft 'Id' een ingestelde waarde. De constante 'Id' wordt later vervangen door een vermogenprofiel.

Er wordt een stroomregeling gebruikt en een toerentalsturing.

Conclusie regeling

In het gebruikte regelschema is er geen sprake van FOC. Er is geen meting van de flux (field). Men meet de stroom en vergelijkt deze stroom met de ingestelde stroom. Er is hier dan ook geen sprake van regeling van de q-component en d-component.

Theoretisch is bij FOC, de stroom voor het veld en de stroom voor het koppel ontkoppeld waardoor de 'Iq1' stroom op '0' kan blijven staan. Er blijkt echter uit metingen dat de teruggekoppelde stroom 'Is' wel degelijk een 'q-component' bezit. De motor ontvangt dus wel reactieve stroom. Het is in praktijk de totale stroom (samengestelde d- en q-stroom) die als terugkoppeling gebruikt wordt om te controleren of de gewenste waarde bereikt is. De motor heeft deze reactieve energie nodig om zijn veld op te bouwen. De reactieve component

zit dus wel in de terugkoppeling, waardoor het maximum van de actieve stroomcomponent beperkt wordt. Deze stroomcomponenten worden daarna nog omgevormd naar spanningen voor het aansturen van de motor via SVM. Als gevolg van de beperking van de actieve stroom wordt de actieve spanning beperkt. Een toename van stroom doet dan het magnetisch veld niet meer toenemen. De motor zit op dat moment in verzadiging.

Dit verklaart het verband tussen de regellus en de spanningsgrafieken in hoofdstuk 4.

3.4.3 Slip

Bij asynchrone motoren bepaalt de slip het snelheidsverschil tussen het draaiveld van de stator en de rotor. De slip wordt bepaald met volgende formule:

$$\text{slip } s = \frac{ns - nr}{ns}$$

$$\text{procentuele slip } s = \frac{ns - nr}{ns} * 100\%$$

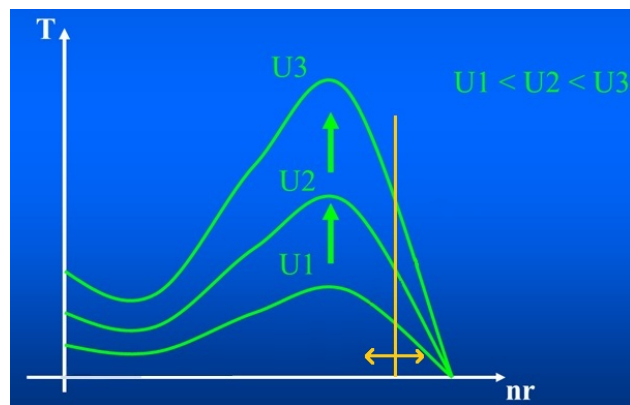
Waarbij:

- ns = toerental van het draaiveld
- nr = toerental van de rotor

Het toerental van het aangelegde statorveld in het regelschema wordt in eerste instantie (Reeks 1: 4.3.1) op 3200rpm gekozen. Om 50 Hz via de generator terug op het net te zetten (zie figuur 4.3) moet zowel de slip van de motor als die van de generator gecompenseerd worden. Er wordt hiervoor bij zowel de motor als bij de generator 100rpm bijgeteld bij het nominaal toerental. In werkelijkheid is het vermogen van de motor groter dan dat van de generator (zie kenplaten begin van dit hoofdstuk). Groter vermogen zorgt voor minder slip bij dezelfde constructie. De motorgeneratorkoppeling wordt hier in een dynamische toepassing gebruikt. D.w.z. dat in tegenstelling tot andere toepassingen, in de proefopstelling niet constant rond het werkpunt van beide machines geregeld wordt. Bij het afspelen van vermogenprofielen wordt er constant versneld en vertraagd, al dan niet in grote stappen. De slip heeft een vrij groot aandeel in het naspelen van zo'n profiel. Om dit (deels) op te vangen wordt een variabel toerental toegevoegd in het model (Appendices B.2).

3.4.4 Variabel toerental

Er wordt geen spanning ingesteld in het model. Vergelijkbaar met het opstarten van een AC motor met regeltransfo verkrijgt men koppel-toerental curves zoals te zien is in figuur 3.4.4, die stijgen met de ingestelde spanning. Het model heeft niet rechtstreeks de mogelijkheid om de spanning te regelen. De grafiek is vanonder vrij plat en bijgevolg geeft dat een laag koppel. Wanneer het toerental mee varieert met de ingestelde stroom (en dus onrechtstreeks ook met de spanning in het model) zal de slip kleiner zijn dan wanneer dit niet toegepast wordt. De implementatie van deze grafiek gebeurt in paragraaf 4.3.4.



Figuur 3.8: Koppelhoerentekarakteristiek bij verschillende spanningen

3.4.5 Magnetische verzadiging

”De inductiemachine is meestal ontworpen om enigzins verzadigd te zijn in het nominale werkingpunt om het maximale koppel te kunnen produceren voor een gegeven machineframe. De stator en rotor tanden hebben de hoogste fluxdichtheid en zijn de delen waar verzadiging vooral optreedt. De fluxdichtheid in het blikpakket is lager, maar verzadiging kan hier ook optreden. De tanden en het blikpakket behoren tot het belangrijkste flux-pad en het is evident dat de magnetiserende inductie verzadigd wanneer de hoofdflex groot genoeg wordt. De verzadigingskenmerken zijn afhankelijk van de geometrische afmetingen van de machine” [28].

Verzadiging wordt een probleem wanneer de nominale U/f verhouding wordt overschreden. Het effect van een motor draaiend aan een lagere U/f verhouding creëert een lager koppel. Een motor laten draaien met een hogere verhouding dan nominaal veroorzaakt buitensporige verliezen en lawaai.

Hoe sneller de motor draait hoe minder spanning verloren gaat over de IGBT's en des te meer overblijft voor de motor. Wanneer de temperatuur van IGBT's toeneemt, neemt de spanning erover af en stijgt de stroom.

3.4.6 IGBT's en duty cycle

De vermogendissipatie voor een IGBT bij een inductieve belasting met vrijloopdiode hangt vooral af van volgende factoren:

- duty cycle δ
- schakelfrequentie f_s
- collectorstroom I_C
- collector-emitterverzadigingsspanning bij de beschouwde waarde van de I_C , $U_{CE(ON)}$.

Duty Cycle:

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (3.1)$$

Volgens Triphase verandert de frequentie van de inverters niet. De motor gaat in verzadiging waardoor de impedantie van de windingen daalt.

Verder opdrijven van het toerental bij hoge stromen zal deze magnetische verzadiging voor een stuk teniet doen.

De praktische kant van dit onderdeel komt terug in punt 4.3.2

3.5 Besluit

Het origineel concept voor deze masterproef, om twee TVM's koppelen bleek niet haalbaar door gebrek aan een scheidingstransfo en de mogelijkheid de actieve stroomcomponent 'Id' te sturen met het gebruikte model.

De opstelling met één TVM en motor-generatorkoppeling biedt een werkend alternatief. Er wordt een mechanische, galvanische scheiding bekomen tussen de netten en er wordt verder gewerkt met inverter 1.

Het alternatief is werkbaar en de eerste testen lukken. Hoofdstuk 4 gaat daarom verder met metingen en optimalisatie.

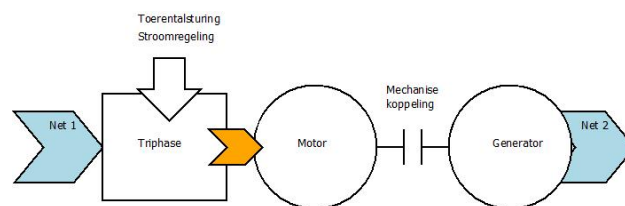
Hoofdstuk 4

Metingen en resultaten

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de limieten bepaald van de proefopstelling met motor-generatorkoppeling voor het emuleren van vermogenprofielen. Er wordt aan de hand van metingen getest hoe snel het systeem reageert op ingestelde stroomsveranderingen.

Vermogen wordt ingesteld via de stroom (samen met toerental, de regelbare parameters)



Figuur 4.1: Motor-generator koppeling

in het Simulink schema (bijlage B). Figuur 4.1 toont een vereenvoudigde versie van de opstelling. De generator aan de andere kant zal energie terugleveren aan het net. Deze zal de motor tegenwerken door een tegenkoppel te genereren, afhankelijk van de grootte van de stroom die terug op het net gestuurd wordt.

In een eerste stap naar het emuleren van vermogenprofielen wordt een verband gezocht tussen de ingestelde stroom en het actief en reactief vermogen dat naar de motor wordt gestuurd.

In een tweede stap wordt bepaald welk verband er bestaat tussen ingestelde stroom en uit het net opgenomen vermogen. Daarvoor wordt gekeken naar de hoeveelheid actieve energie die verloren gaat door de TVM. Daarnaast wordt bepaald hoe groot het verband is tussen het gewenst actief vermogen en het totale vermogen naar de motor. Met dit verband kan de regeling aangepast worden naar een uit het net opgenomen vermogenprofiel en de bijhorende stroom die daar voor nodig is.

De kenplaten van de motor en generator:

V	Hz	A	kW	cos	NOM.EFF	1/min	V	A
400 Δ	50	15.2	7.50	0.82	87.0	1450	380-420	15.2-15.2
690 Y	50	8.8	7.50	0.82	87.0	1450	660-725	8.9-8.9
460 Δ	60	14.6	8.6	0.84	88.0	1750	440-480	14.9-14.7

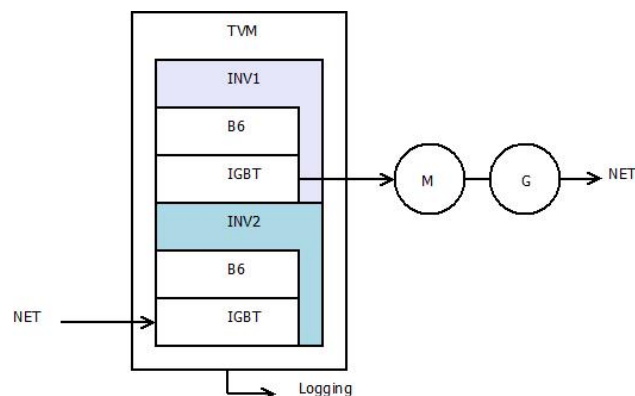
Figuur 4.2: Kenplaten, links motor rechts generator

Er wordt afgesloten met resultaten die bekomen zijn na wijzigingen in het regelschema.

4.2 Meetopstelling

Figuur 4.3 toont een vereenvoudigde versie van de meetopstelling. De onderdelen van TVM op de LCL-elementen na. De DC-bus wordt via een transformator (400→480V) opgeladen zodat de PLC die zich in de TVM bevindt, voorzien wordt van voeding. De pc heeft een afzonderlijke voeding. Alleen de PLC en de I/O-modules worden gevoed met 24V. De 24V wordt afgeleid van de DC-bus. Tijdens de meting voedt de diodebrug van inverter2 de DC-bus. De DC-bus wordt via het model ingesteld op een hogere spanning zodat er geen voeding meer nodig is via de diodebrug zodra het model opgestart wordt. Overwegend actieve energie laadt de DC-bus via inverter2. Via inverter 2 wordt praktisch alleen actieve energie opgenomen voor het opladen van de DC-bus.

Het model logt de verschillende parameters voor beide invertoren. Zo worden naar de



Figuur 4.3: Meetopstelling

motor toe (INV1) volgende parameters opgenomen:

- klok,

- I_{inv1} ,
- U_{DC} .

Van het net naar de TVM (INV2) worden deze parameters opgenomen:

- $klok$,
- V_{grid} ,
- V_{cap} ,
- I_{inv} ,
- I_{grid} ,
- U_{DC} .

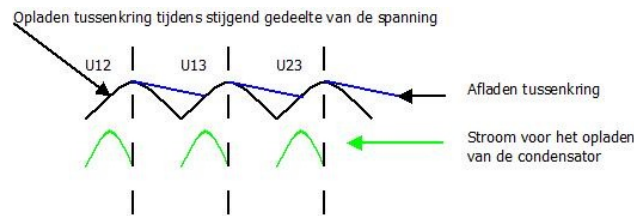
Aan de kant van inverter zijn de parameters uit de hardware blok niet voldoende. Zo is er geen hardwarematige meting voorzien om de uitgangsspanning te meten. Het model verschaft wel de mogelijkheid om via U_d en U_q onrechtstreeks de totale uitgangsspanning naar de motor toe (INV1) te bepalen. Deze parameters werden aan de logfile toegevoegd. Daarnaast werd ook de ingestelde stroom I_d en reactieve stroom I_q gelogd. De extra opgenomen parameters opgesomd:

- $klok$,
- U_d, U_q ,
- I_d, I_q .

Naast de meetopstelling toont figuur 4.3 ook een vereenvoudiging van het elektrisch schema (bijlage A). In tegenstelling tot de beschrijving uit hoofdstuk 3, waarbij twee TVM modules gebruikt werden als opstelling, wordt nu slechts één TVM gebruikt.

Zowel de B6 brug als het IGBT-gedeelte van inverter2 kunnen de DC-bus op peil houden maar enkel via het IGBT-gedeelte valt de hoek te regelen die uiteindelijk mee het vermogen bepaalt. De stroom voor het opladen van de DC-bus van inverter2 (IGBT) is sinusvormig in tegenstelling tot het B6-brug gedeelte (figuur 4.4). De B6 brug laadt de condensator op wanneer de lijnspanning maximaal is. Als zijn maximum voorbij is ontladde de condensator. Hierbij komt de stroompiek voor de spanningspiek wat wijst op een deel reactieve stroom. De maximum faseverschuiving via de diodebrug (B6) is 60° .

De IGBT's van Inverter2 bouwen de spanning op om zo als voorijlende bron actief vermogen te leveren. De actieve stroom wordt apart via een PI regelaar geregeld om samen te vallen met de actieve spanningscomponent.



Figuur 4.4: Stroomverloop B6-brug inverter2

4.3 Metingen

4.3.1 Vast toerental 3200rpm

Bij opstart wordt de asynchrone generator aan het net gekoppeld in motorwerking. Hij zal iets trager dan synchroon draaien (praktisch geen slip) omdat hij onbelast is. Wanneer het motormodel wordt opgestart, zal de motor aan het ingestelde toerental plus de slip draaien. Deze slip wordt gedeeltelijk bepaald door de generator en de motor. Er wordt in eerste instantie een toerental van 3200 tr/min ingesteld om de slip van de motor en de generator te compenseren en om, via de generator, actief vermogen te leveren aan het gekoppelde net.

De parameters 'Ud' en 'Uq' bleken de belangrijkste parameters uit een eerste reeks metingen. Deze tonen de grootste verschillen en overgangsverschuiven bij het wijzigen van de ingestelde stroom. In deze reeks metingen met een vast toerental van 3200rpm wordt gekeken hoe het systeem reageert.

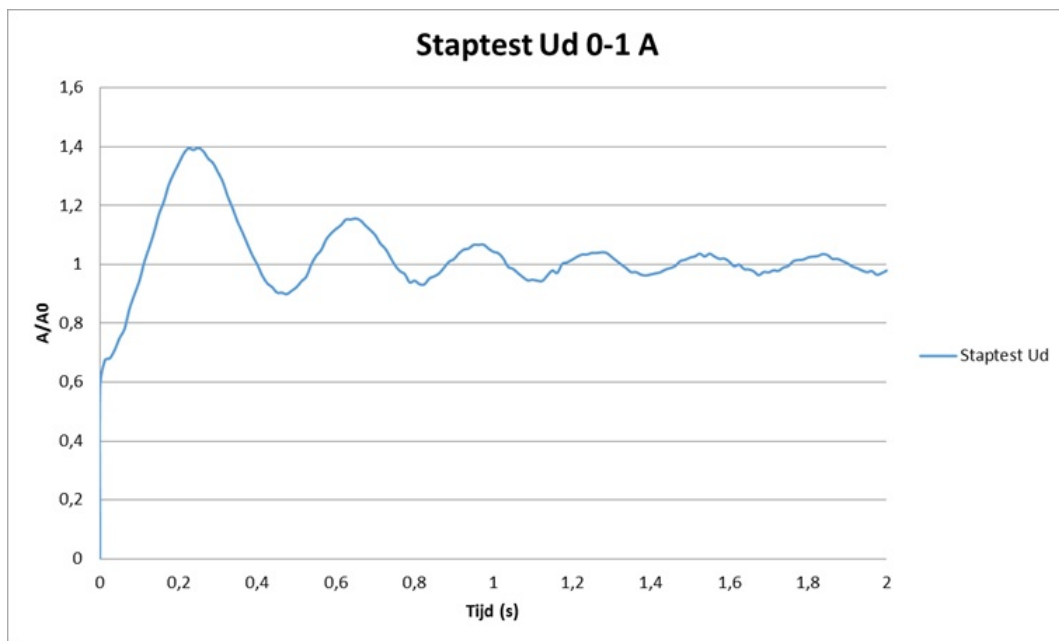
Figuren 4.5 en 4.6 tonen de staprespons voor de actieve spanningscomponent 'Ud' respectievelijk bij een stap van 0 naar 1A (zeer lage spanning leidt tot een zeer laag koppel) en van 13 naar 14A. De spanning is gestegen maar is nog steeds niet optimaal. Het koppel is dus nog steeds beperkt. De grafiek toont in het eerste geval een overshoot van 35,98%. Bij hogere stromen blijkt er met 3,96% slechts 1/10de van deze overshoot te zijn. Het uitdempen van het overgangsverschuiven duurt echter bij beide stappen even lang. Uitdempen hier in de zin dat ze hun blijvende foutmarge bereikt hebben.

Eigenschappen van de staptest van Ud van 0 naar 1 A:

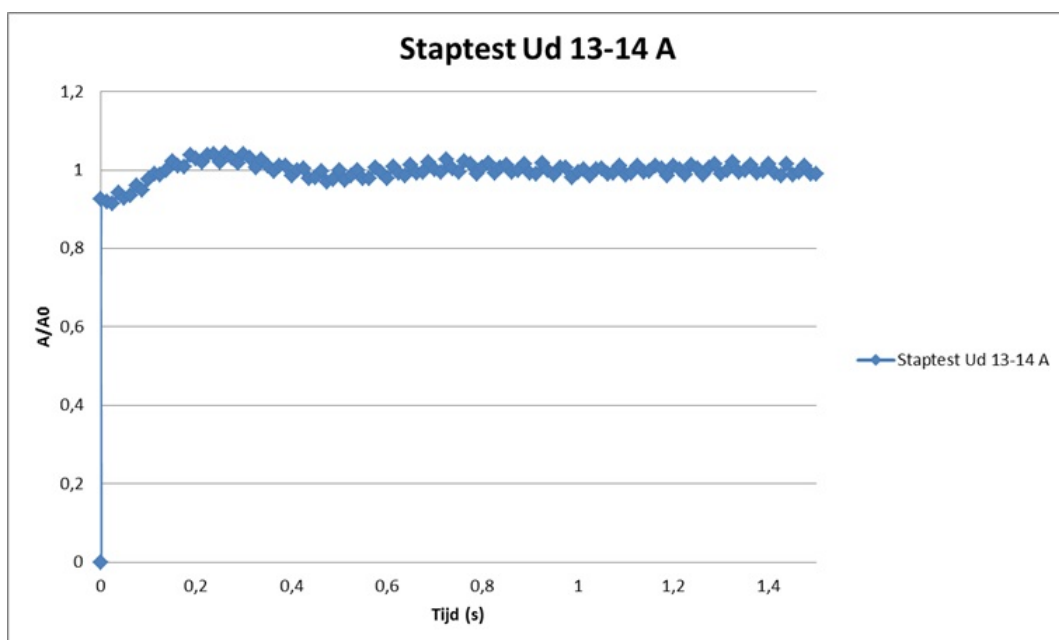
- top bereikt na 275 ms
- gedempte eigen- periode, frequentie en pulsatie: 0,375 s ; 2,67 Hz ; 16,76 rad/s
- overshoot $D = 0,3598$ of 35,98
- demping $Z=0,3094$
- binnen 1s: 5,4% foutmarge
- blijvende foutmarge 2,8%

Eigenschappen van de staptest van Ud van 13 naar 14 A:

- top bereikt na 237 ms
- gedempte eigen- periode, frequentie en pulsatie: 0,487 s ; 2,05 Hz ; 12,89 rad/s
- overshoot $D = 0,0396$ of 3,96
- demping $Z=0,7167$
- blijvende foutmarge 2%

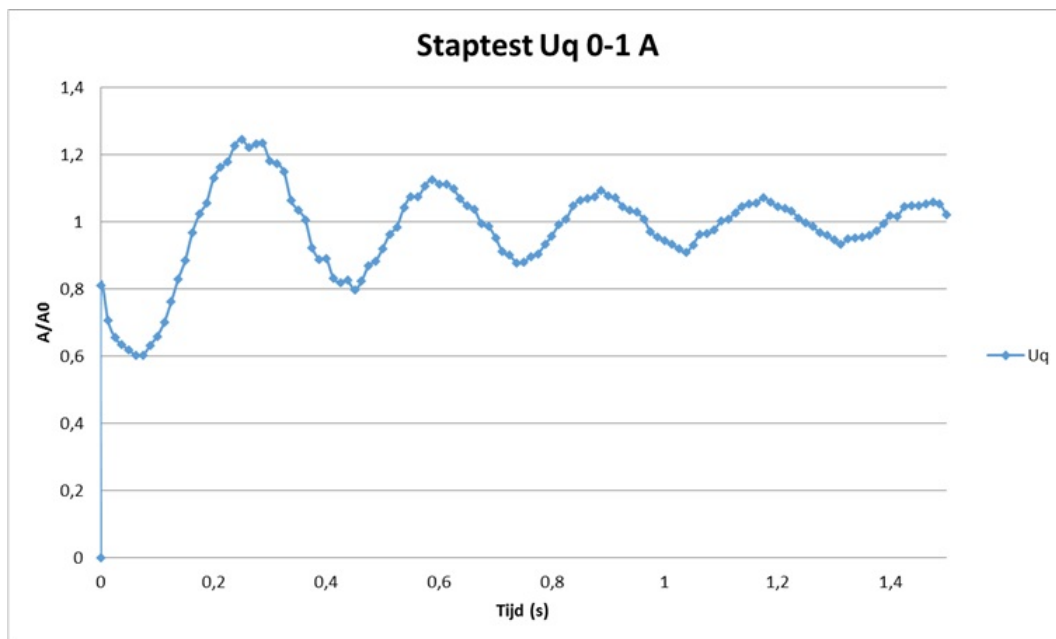


Figuur 4.5: Staprespons Ud 0 naar 1A

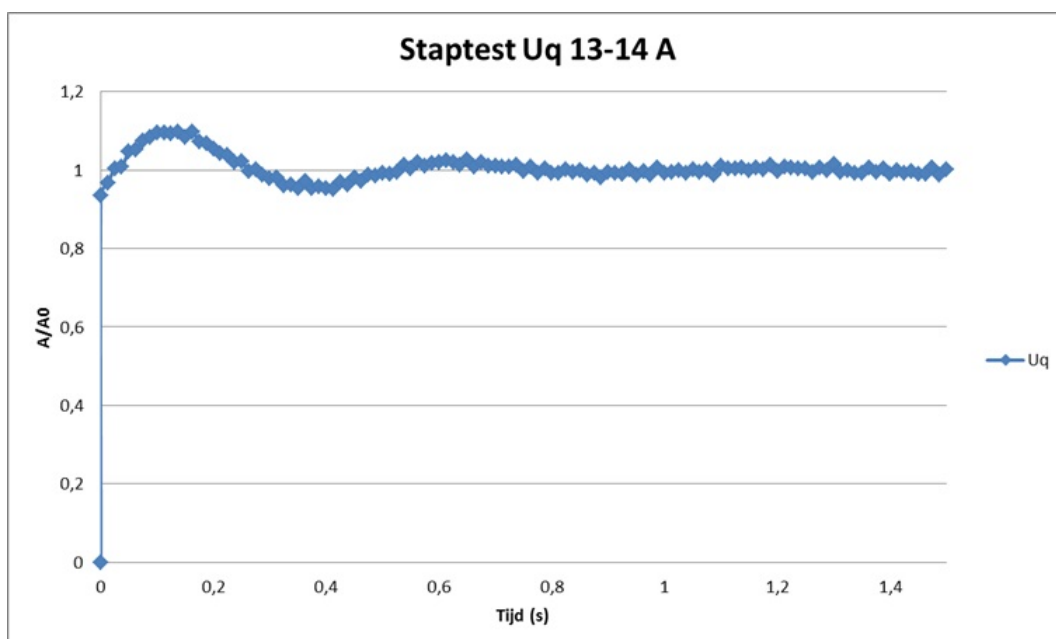


Figuur 4.6: Staprespons Ud 13 naar 14A

Figuren 4.7 en 4.8 tonen de staprespons voor de reactieve spanningscomponent 'U_q', ook eerst van 0 naar 1A en daarna van 13 naar 14A. Bij lage stroom blijkt de eerste overgang zelfs verschillend qua vorm. In tegenstelling tot de actieve spanningscomponenten daalt het foutpercentage op de metingen naarmate de stroom stijgt. Men kan stellen dat in beide gevallen een vrij grote overgang optreedt en dat beide parameters niet hetzelfde reageren op het stijgen van de ingestelde stroom.

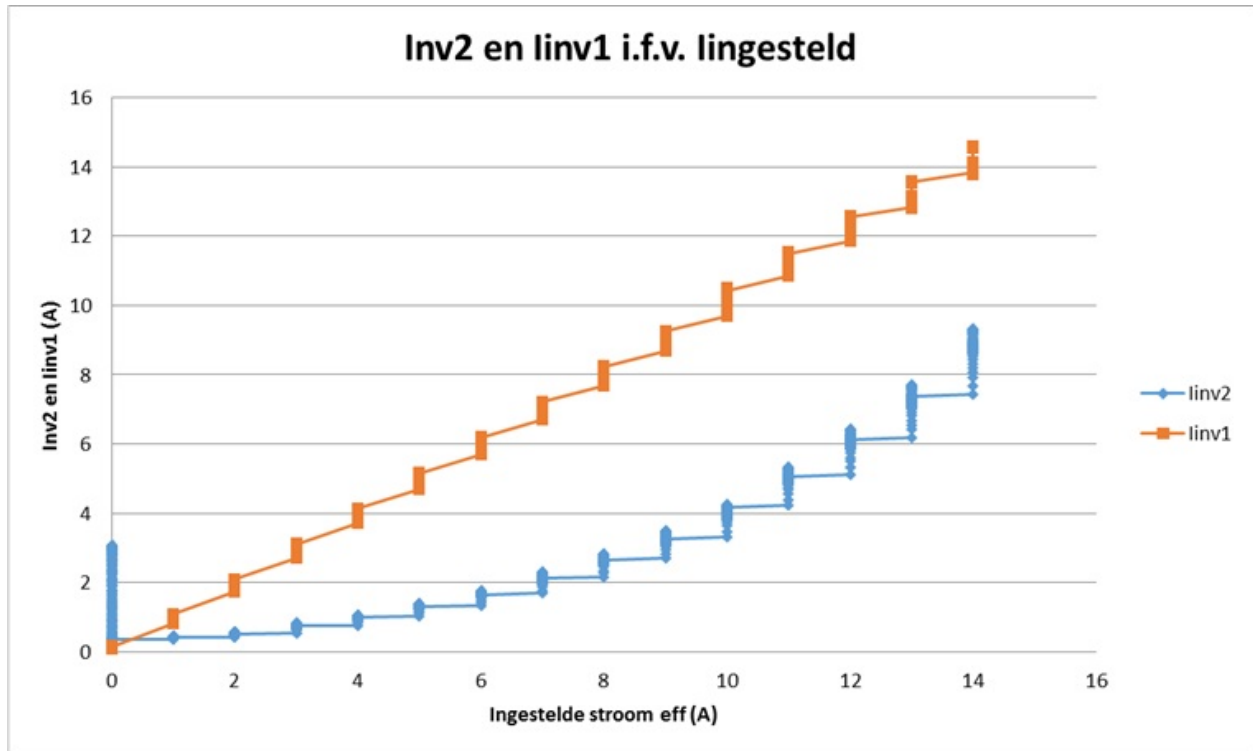


Figuur 4.7: Staprespons U_q 0 naar 1A



Figuur 4.8: Staprespons U_q 13 naar 14A

Vervolgens toont figuur 4.9 de verschillende gemeten stromen in de twee inverters afhankelijk van de effectief ingestelde stroom. Deze ingestelde stroom werd met stappen van 1A verhoogd van 0 tot en met 14A. Bij een ingestelde stroom van 10A in het model, wordt er 4A gemeten aan de kant van inverter2 en 10A aan inverter1 (stroom die naar de motor vloeit). Dit verschil heeft aanleiding gegeven tot een nieuwe reeks metingen (reeks 2) waarvan de slip minder groot is.



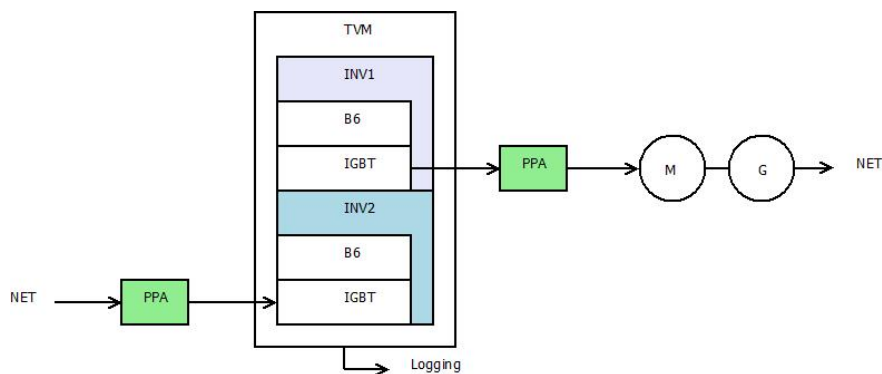
Figuur 4.9: Stroom door inverter1 en inverter2

De slip werd te hoog geschat; 100rpm voor de motor en 100rpm voor de generator. De stromen verschilden te veel. Er werd 10 A ingestoken en er werd slechts 4 á 5 A uitgehaald bij 3200rpm. Dit is uiteraard veel te weinig en daarom werd beslist dezelfde metingen opnieuw te doen met een lager toerental.

4.3.2 Vast toerental 3050 en 3100rpm

Er wordt verwacht dat bij een lager toerental het verschil tussen de stroom aan de ingang en uitgang niet meer zo groot zal zijn. Dezelfde meting als in vorige sectie wordt daarom opnieuw uitgevoerd met 3050 en 3100rpm.

Verder valt op dat met de tot nog toe gelogde parameters van het model niets verteld wordt over het vermogen. Met de parameters naar de motor toe (INV1) kan rechtstreeks of onrechtstreeks geen vermogen bepaald worden. Daarom werd een externe meter, de Power Analyser PPA 1530 toegevoegd aan de meetopstelling. Met dit toestel kan de spanning gecontroleerd en het vermogen rechtstreeks opgenomen worden. Aangezien er zo maar één toestel ter beschikking was, werden in- en uitgang van de TVM om de beurt opgemeten. De vermogen, spanningen en frequentiegrafieken in het verder verloop van dit hoofdstuk zijn afkomstig uit de Power Analyser (PPA). Zie figuur 4.10. Het eerste deel van de sectie bevat vermogens,



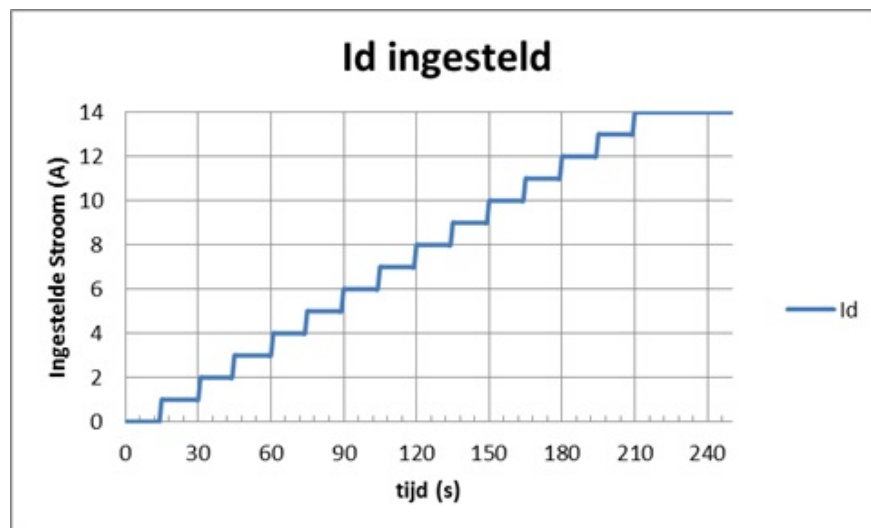
Figuur 4.10: Meetopstelling

spanningen en frequenties bij toerentalinstellingen van 3050 en 3100rpm. Een 2de deel bevat de gelogde parameters 'Ud' en 'Uq' zoals in voorgaande sectie om te kunnen vergelijken. Deze sectie met vaste toerentallen 3050 en 3100rpm heeft als bedoeling te controleren of bepaalde eigenschappen (reactietijd, overshoot) beter worden wanneer er minder slip optreedt.

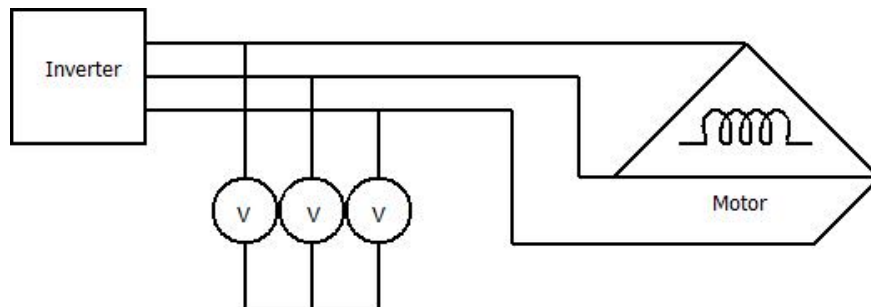
Figuur 4.11 toont het aangelegde stroomprofiel dat gebruikt werd om de grafieken op de volgende pagina's te bekomen. De x-as toont de tijd, de y-as toont het stroomprofiel, dat om de 15 s (bovenste x-as kijken) met 1 A stijgt.

In het vervolg van dit hoofdstuk worden een aantal spanningsmetingen getoond. De spanningsaansluitingen van de PPA werden met kunstmatig sterpunt (figuur 4.12) opgezet voor deze metingen. De motor is aangesloten in driehoek waardoor de lijnspanning U_L en de fasespanning U_f hetzelfde zijn. Om U_L of U_f te bekomen moet de grafiekwaarde nog maal $\sqrt{3}$ gedaan worden. M.a.w. wanneer de grafiek boven de 230V zit, zit men over de nominale spanningswaarde voor de motor.

In figuren 4.13 en 4.14 tonen het vermogen naar de motor toe vanuit inverter1. In het



Figuur 4.11: Id stroomprofiel

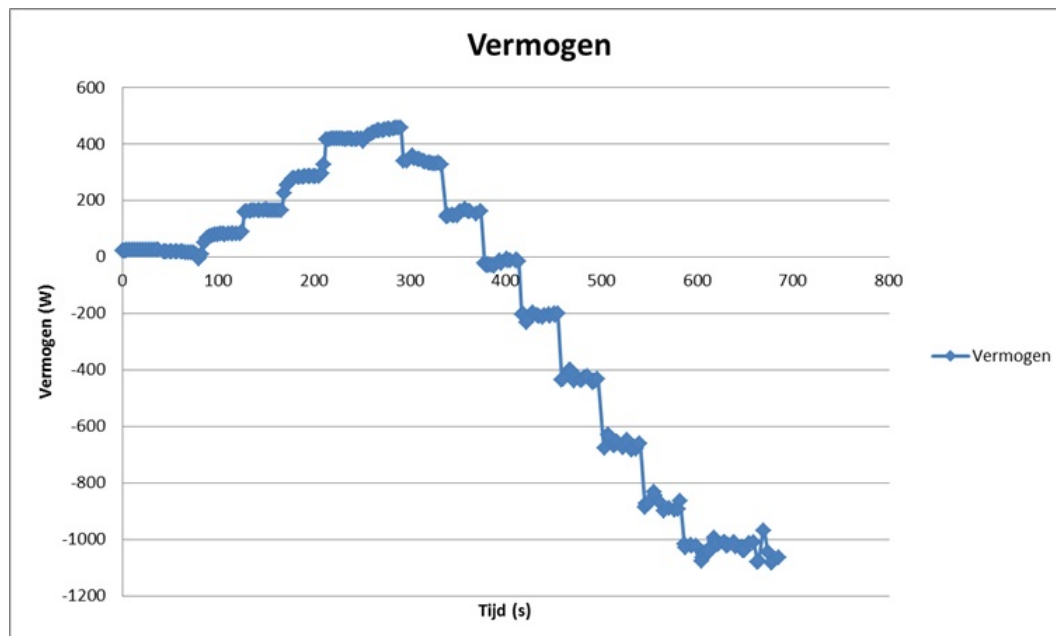


Figuur 4.12: Spanningsmeting met kunstmatig sterpunt

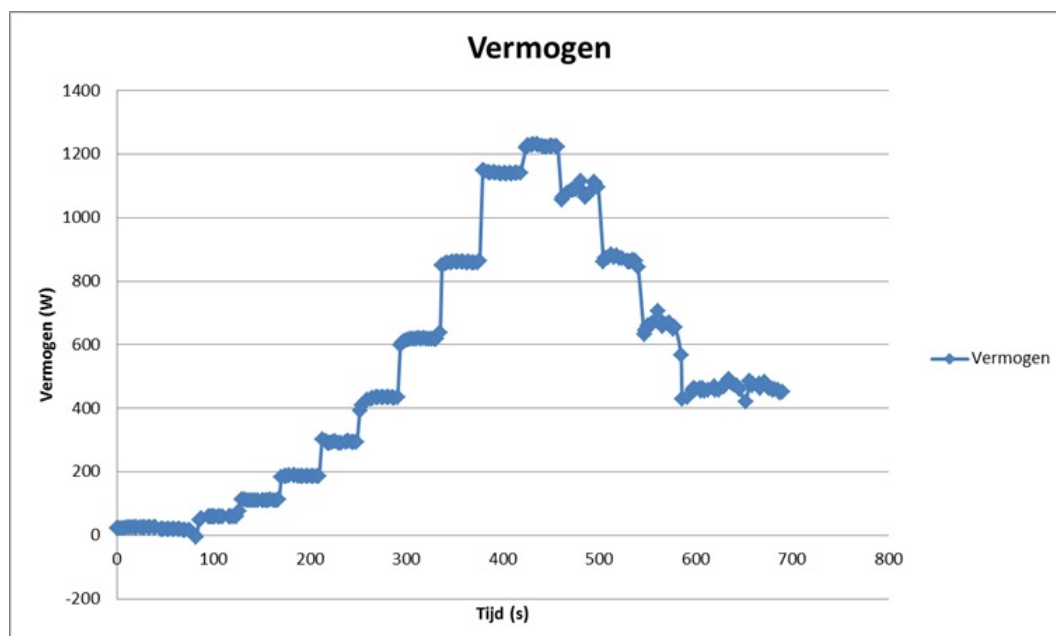
eerste geval, bij een instelling van 3050 toeren, is het toerental net te laag om de slip van de motor en de generator te compenseren of m.a.w. de generator te doen leveren aan het net. Hierdoor wordt iets na 400s gewisseld van teken en is het de generator die de motor aandrijft. Er wordt dan vermogen geleverd aan de TVM.

De slip is 'ok' voor laag toerental. Daarna gaat de motor in verzadiging en wordt er vooral reactief vermogen geleverd en geen actief vermogen.

Figuur 4.14 toont dat bij een toerental van 3100rpm, het vermogen dat de motor kan leveren langer kan blijven stijgen bij stijgende ingestelde stroom. Desondanks is de slip nog niet optimaal. Vanaf 10A ingesteld (of na 470 seconden), zakt het geleverd vermogen. De slipcompensatie is ook hier voor hogere stromen nog niet voldoende gedaald. De ingestelde slip kan niet goed zijn over het volledige stroom- en vermogengebied. Laag vermogen vereist kleine slip, groot vermogen vereist grote slip.

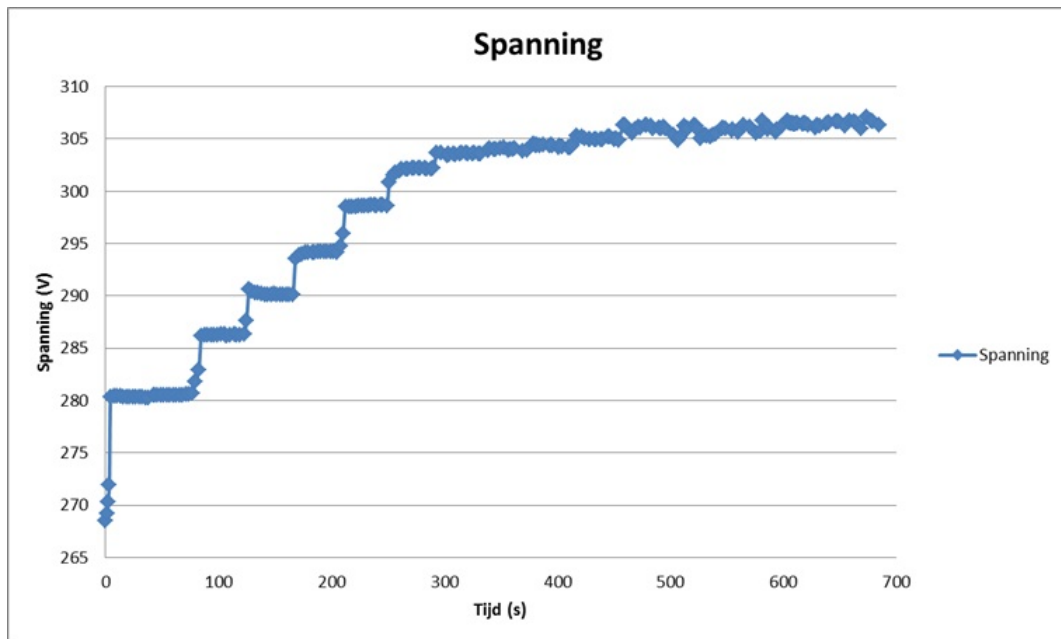


Figuur 4.13: Invertervermogen 0-14A stap 1A 3050rpm

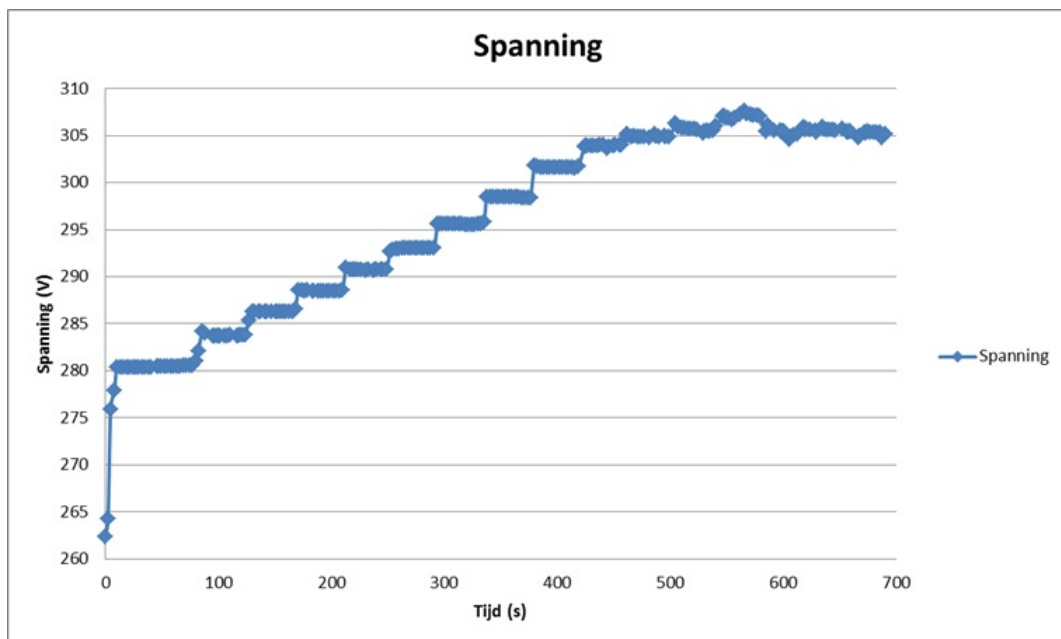


Figuur 4.14: Invertervermogen 0-14A stap 1A 3100rpm

Figuur 4.15 en 4.16 tonen het verloop van de spanning van de motor bij respectievelijk 3050 en 3100rpm. Zoals aan het begin van deze sectie beschreven is de fase- of lijnspanning $\sqrt{3}$ keer groter omdat de meting uitgevoerd werd met kunstmatig sterpunt. In de figuur valt op dat wanneer de ingestelde stroom met 1A stijgt, de spanningssprongen groter zijn bij 3050rpm dan bij 3100rpm. Verder blijven beide curves hangen bij een spanning van 305V. De motor gaat daar in zware verzadiging omdat de spanning te hoog gestegen is.

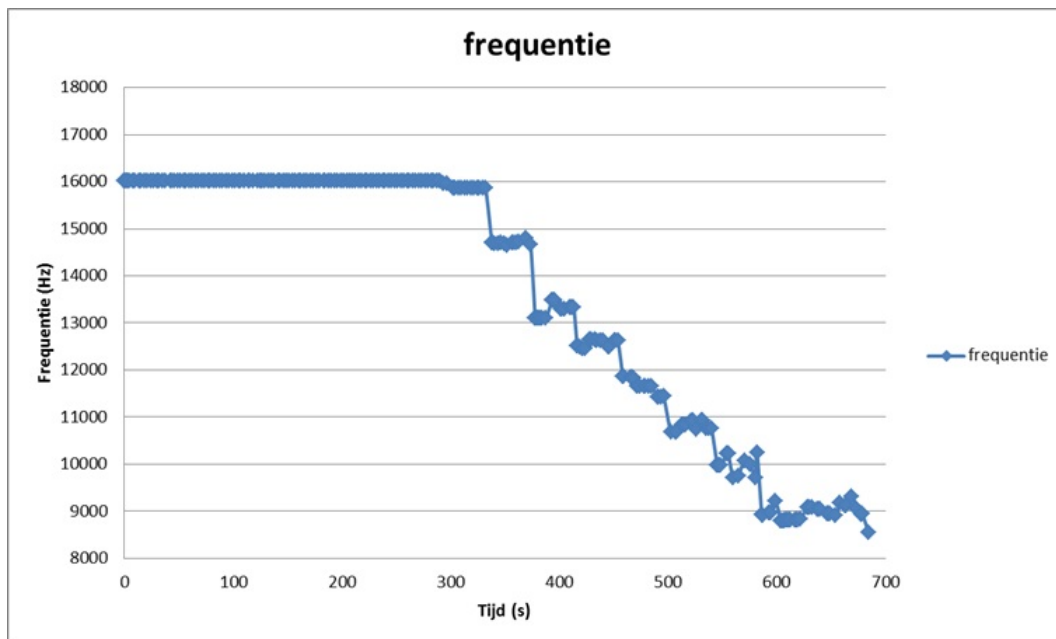


Figuur 4.15: Inverterspanning 0-14A stap 1A 3050rpm

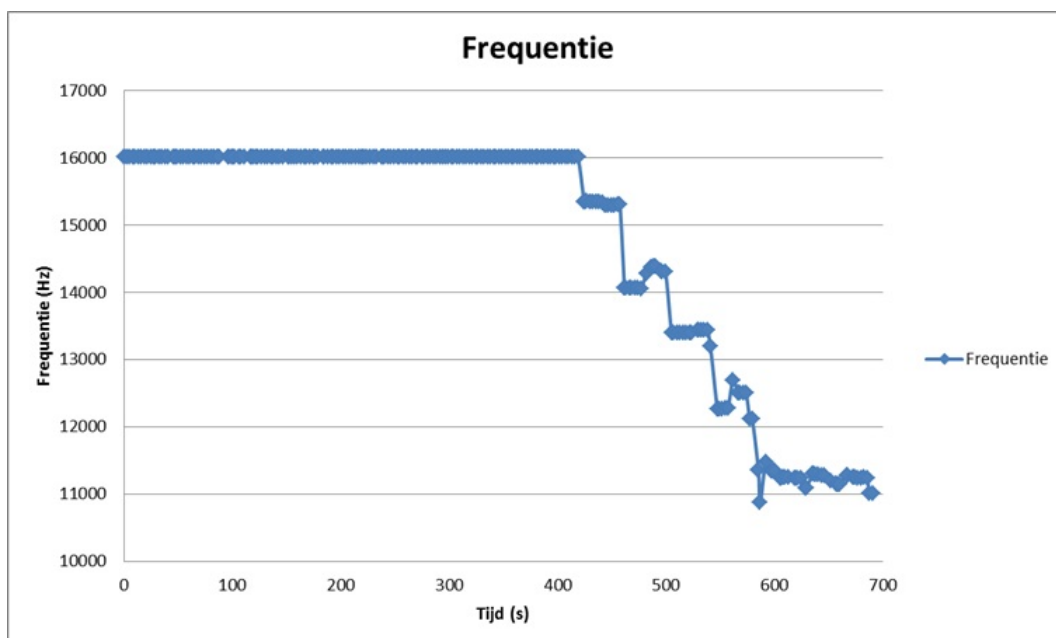


Figuur 4.16: Inverterspanning 0-14A stap 1A 3100rpm

De frequentiegrafieken werden opgenomen door de PPA. Figuur 4.17 en 4.18 tonen het frequentieverloop bij 3050 en 3100rpm. Als men deze grafieken vergelijkt met deze van het vermogen zien we dat dit niet langer stijgt op het moment dat de frequentie begint te dalen. Zowel het vermogen als de frequentiegrafieken lijken te dalen op het moment dat de spanning zorgt dat de motor in verzadiging geraakt. Verder kan men zien dat hoe eerder de verzadiging optreedt, hoe eerder de vermogen en frequentiegrafiek beginnen te dalen.

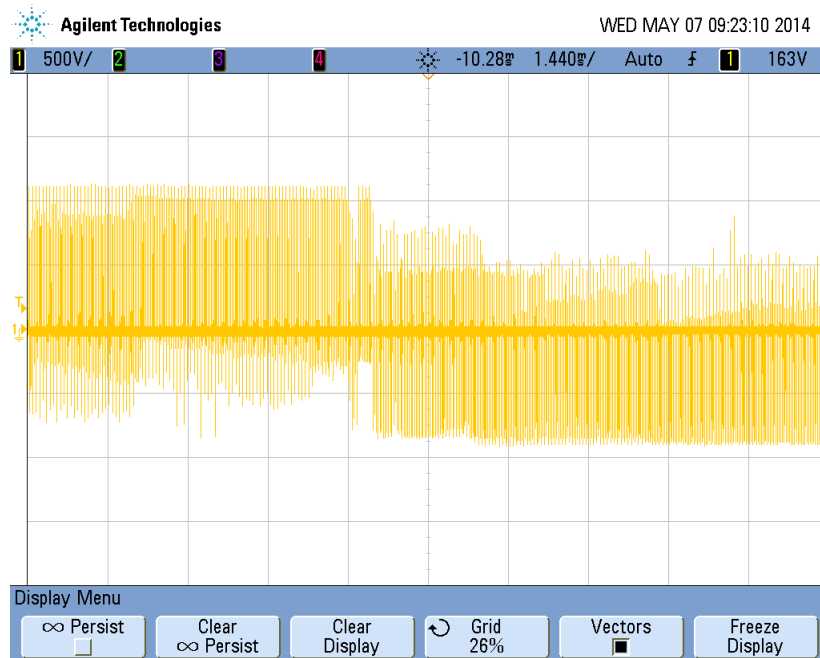


Figuur 4.17: Inverterfrequentie 0-14A stap 1A 3050rpm

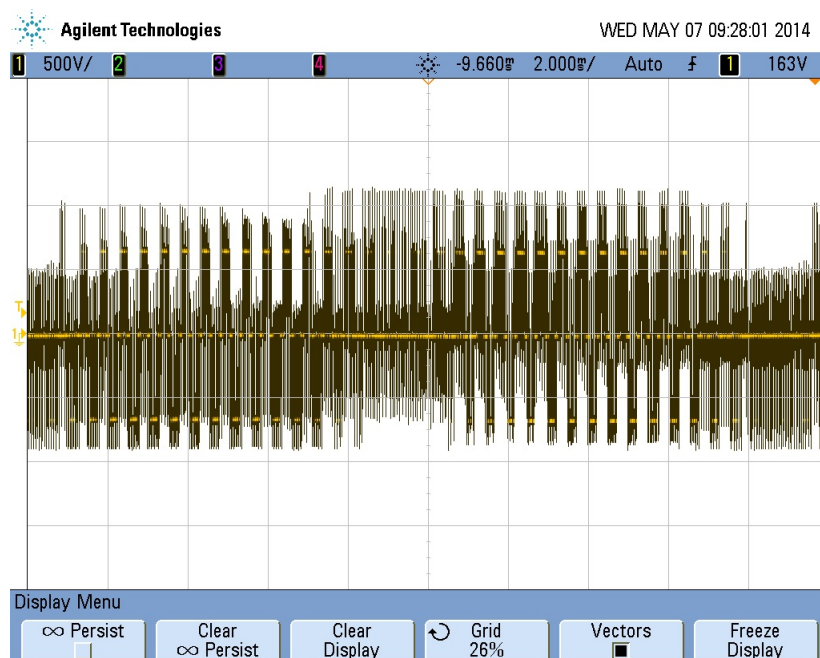


Figuur 4.18: Inverterfrequentie 0-14A stap 1A 3100rpm

In figuur 4.19, 4.20 en 4.21 worden scoopbeelden getoont bij respectievelijke stroominstellingen van 10, 11 en 12 A. Ze geven aan dat het schakelgedrag van de inverter wijzigt wanneer de motor in verzadiging gaat. Hierdoor zal de sturing moeten in grijpen om de stroom te beperken. Dit geeft waarschijnlijk een verandering in schakelgedrag die de PPA interpreteert als een verandering in puls-frequentie. In figuren 4.20 en 4.21 zijn kleine onderbrekingen te

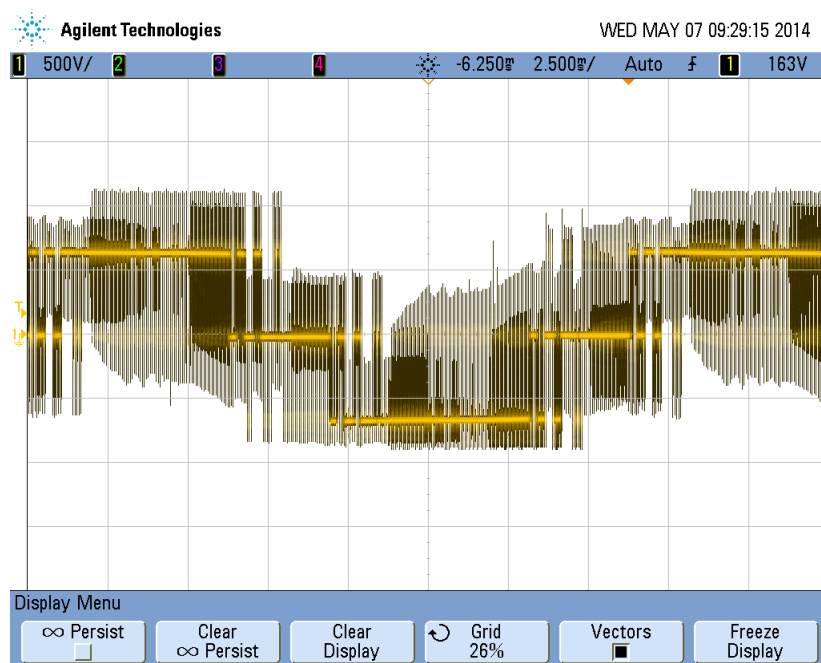


Figuur 4.19: PWM signaal 10 A



Figuur 4.20: PWM signaal 11 A

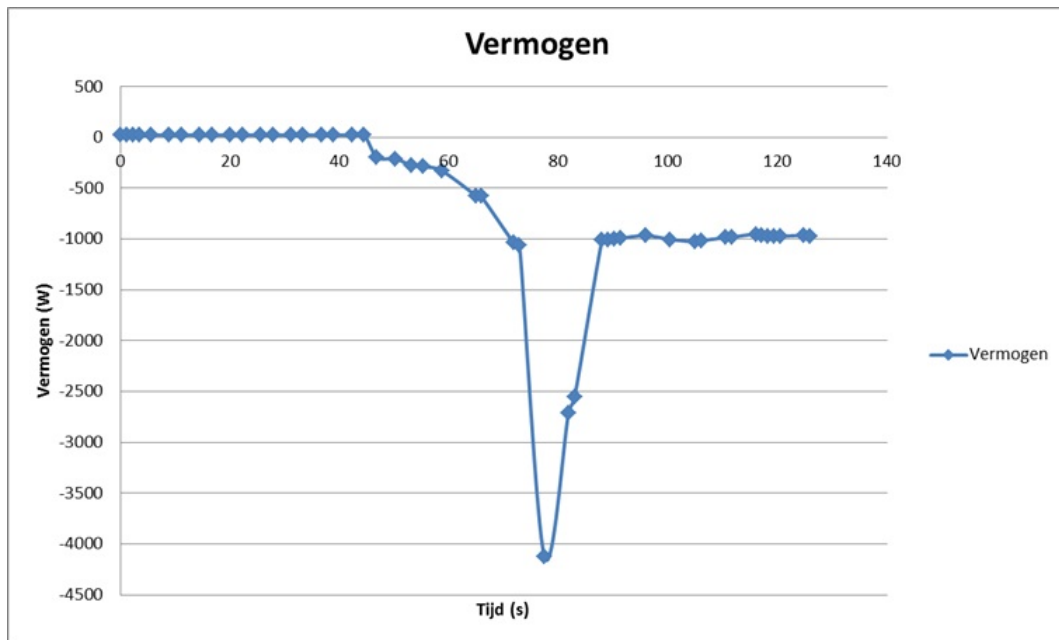
zien.



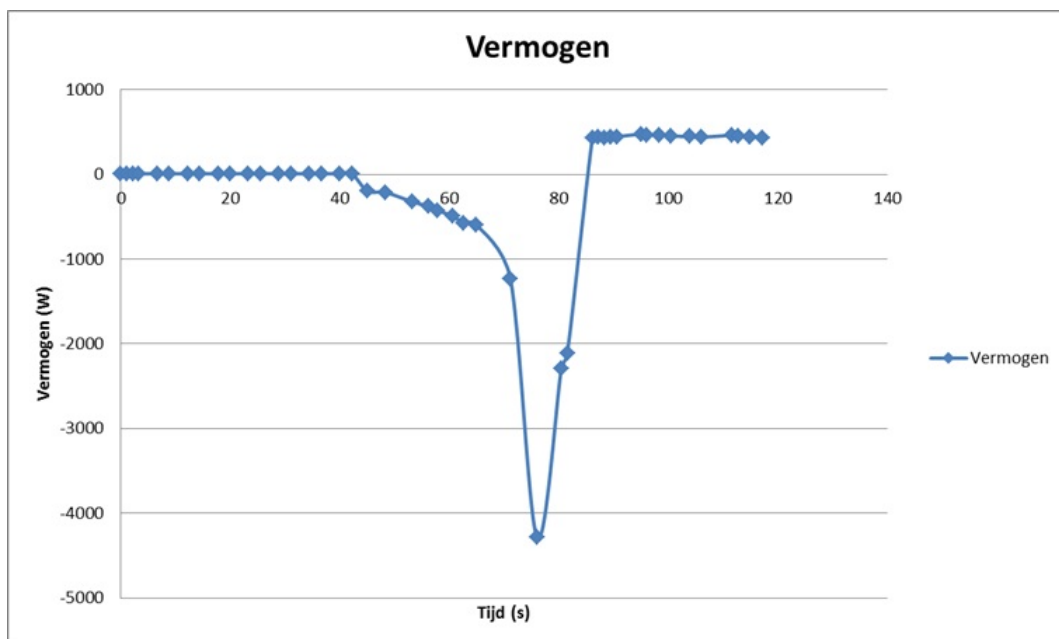
Figuur 4.21: PWM signaal 12 A

Het vermogen in de grafieken daalt dus wel degelijk. De frequentie en de duty cycle waarschijnlijk niet omdat dat dit net een grotere stroom zou veroorzaken i.p.v. ze te limiteren. Het fenomeen van een dalende frequentiegrafiek komt verder in deze sectie nog eens voor en heeft dezelfde verklaring.

Figuur 4.22 en 4.23 tonen de reactie van het vermogen naar de motor bij een stap van 0 naar 14A in één keer. De stap werd uitgevoerd na ongeveer 45 seconden. In beide gevallen is duidelijk dat de opstelling het gewenste stroompatroon niet volgt. In het eerste geval, bij 3050rpm wordt het vermogen op het einde van de stap zelfs negatief. De motor zal zich ook hier net zoals in figuur 4.13 in generatorwerking bevinden. In het 2de geval, bij 3100rpm wordt het vermogen naar het einde van de stap toe wel positief. De curve komt ook op die plaats niet in de buurt van het gewenste vermogen bij deze ingestelde stroom.

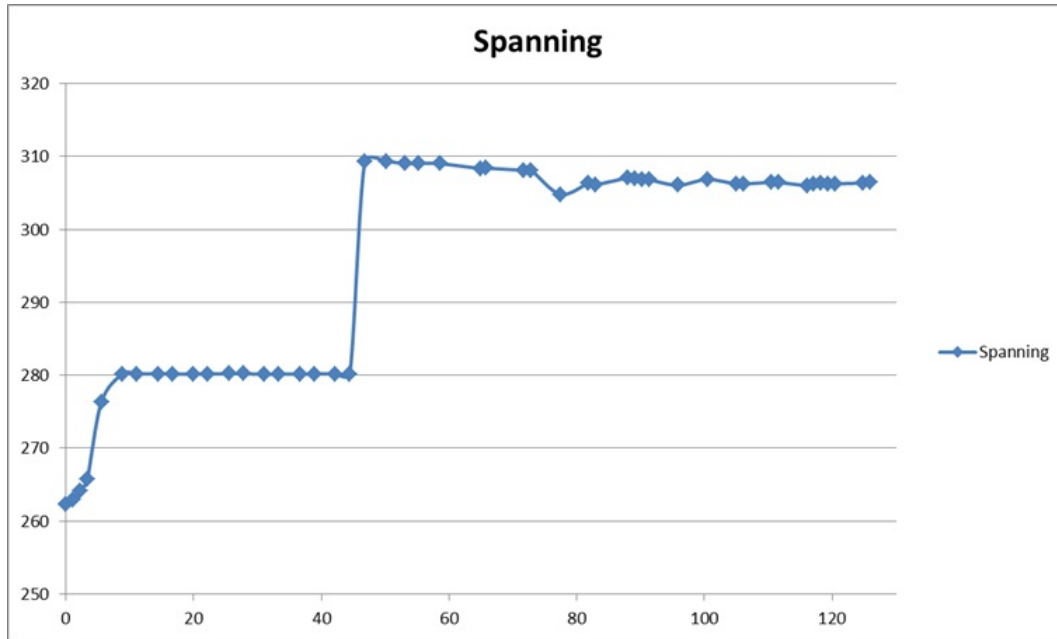


Figuur 4.22: Invertervermogen 0-14A stap 14A 3050rpm

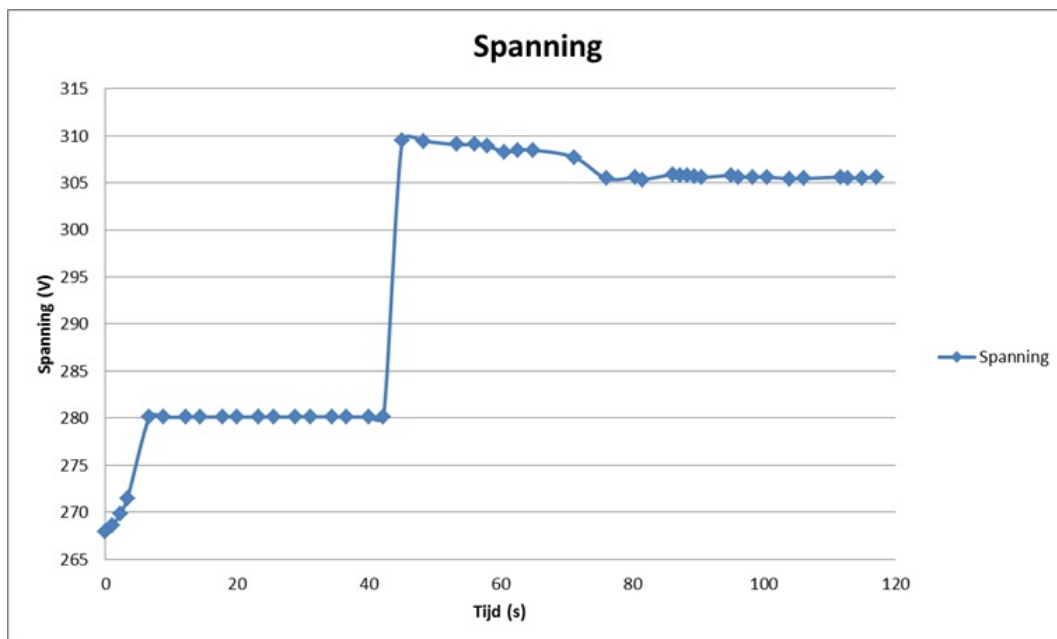


Figuur 4.23: Invertervermogen 0-14A stap 14A 3100rpm

Figuur 4.24 en 4.25 tonen vervolgens het verloop van de spanning ($U_L = U_f = \sqrt{3}$ *grafiek waarde) bij dezelfde stap van 0 naar 14A na 45s. De spanning is hoger dan de nominale spanning van 230V op de grafiek ($U_L=U_f=400V$). Bijgevolg gaat de motor in verzadiging. Beide spanningscurves vertonen ongeveer hetzelfde verloop qua vorm en eindwaarde. Ook tussen 0 en 8 seconden zien we een overgang naar 280V. Om extra overgangsverschijnsel te vermijden wordt de stap van 0 naar 14 A pas aangelegd na een bepaalde vaste tijd (in dit geval ongeveer 45s).



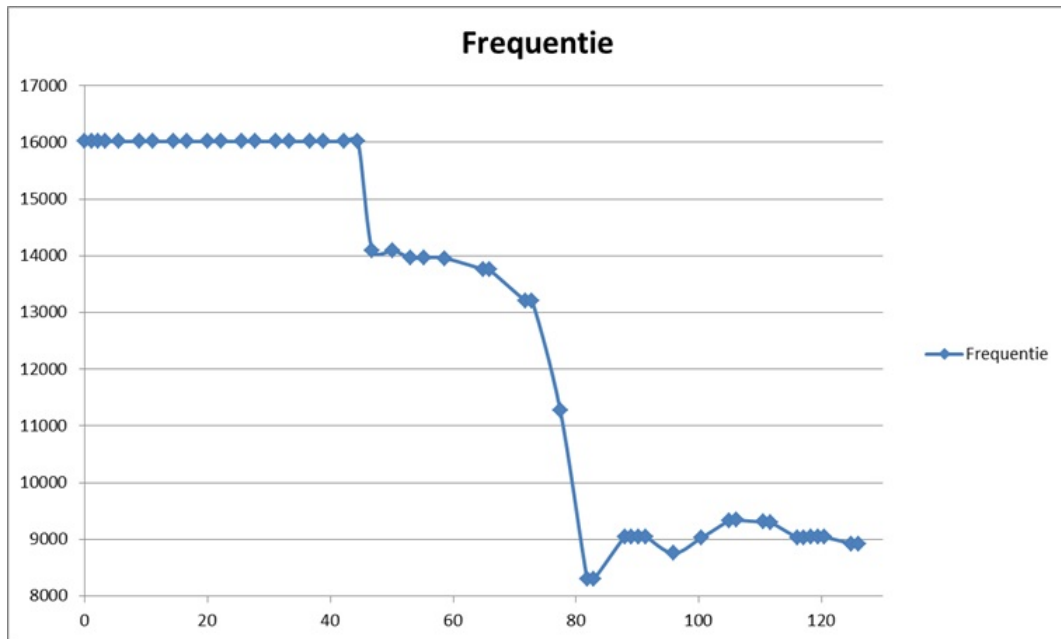
Figuur 4.24: Inverterspanning 0-14A stap 14A 3050rpm



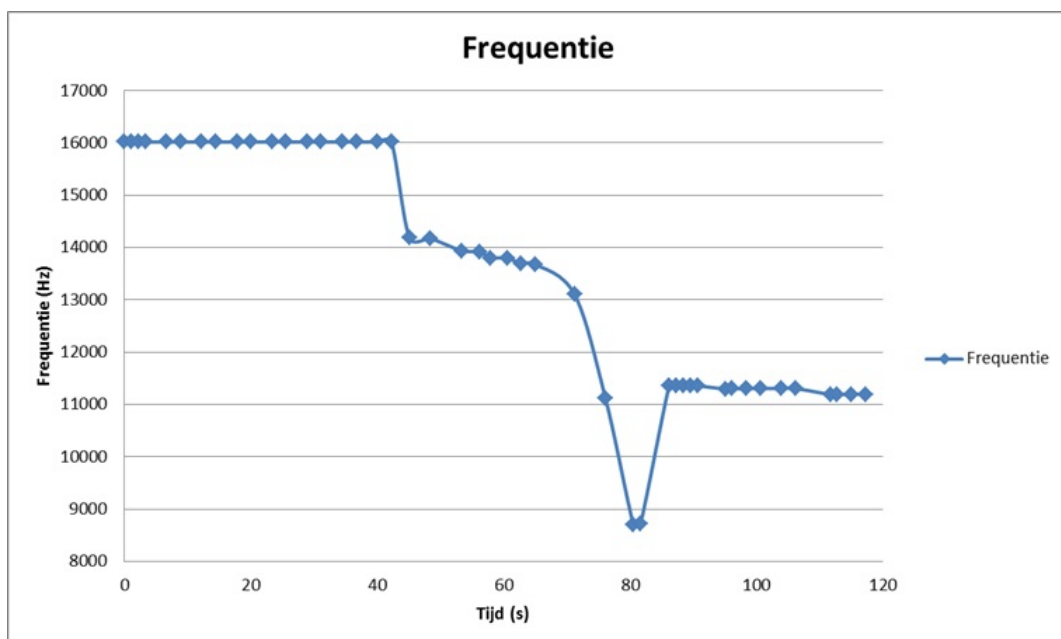
Figuur 4.25: Inverterspanning 0-14A stap 14A 3100rpm

Figuur 4.26 en 4.27 tonen de schakelfrequentie van de inverter bij een stap van 14A na 45s. Beide figuren tonen net als eerder dat de schakelfrequentie gaat zakken op het moment dat de spanning ongeveer 305 a 310V bereikt. Beide grafieken hebben qua vorm een gelijkaardig verloop maar het valt hier op dat bij 3100rpm de schakelfrequentie hier op het einde hoger ligt dan bij 3050rpm.

Verder volgt dezelfde verklaring als bij figuur 4.17 en 4.18, dat frequentiedaling een interpretatie is van de PPA door een gewijzigd schakelgedrag van de inverter.

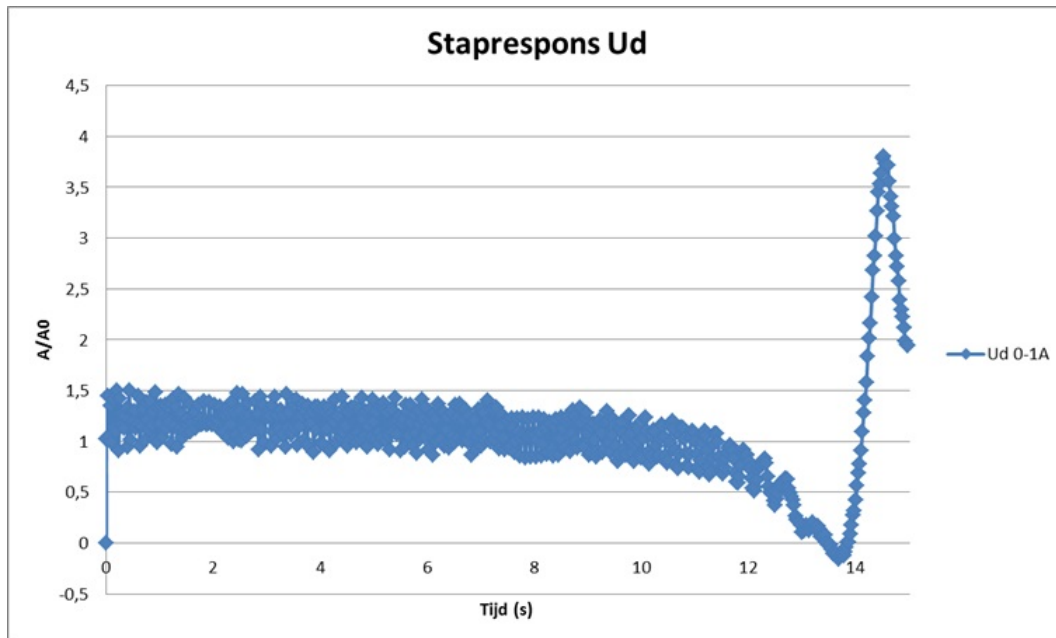


Figuur 4.26: Inverterfrequentie 0-14A stap 14A 3050rpm

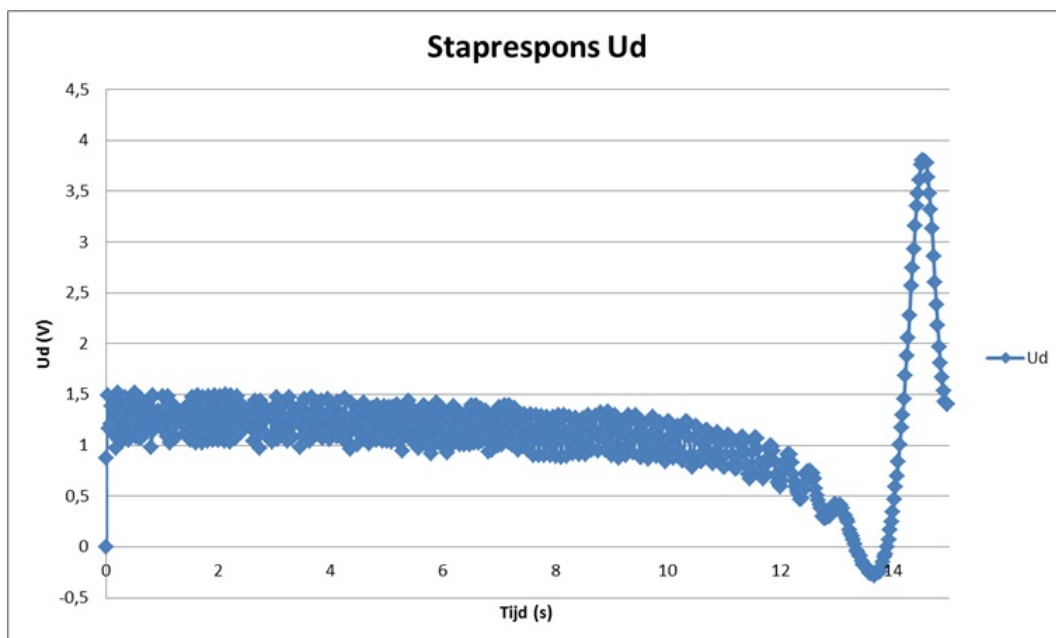


Figuur 4.27: Inverterfrequentie 0-14A stap 14A 3100rpm

Om de vergelijking te kunnen maken met de eerste reeks worden de parameters 'Uq' en 'Ud' bij deze twee toerentallen en verschillende stapgroottes bekeken. Figuren 4.28 en 4.29 tonen de staprespons van 0 naar 1A bij respectievelijk 3050 en 3100 toeren. Beide grafieken tonen vrijwel een gelijkaardig verloop met een foutmarge van ongeveer 50%.



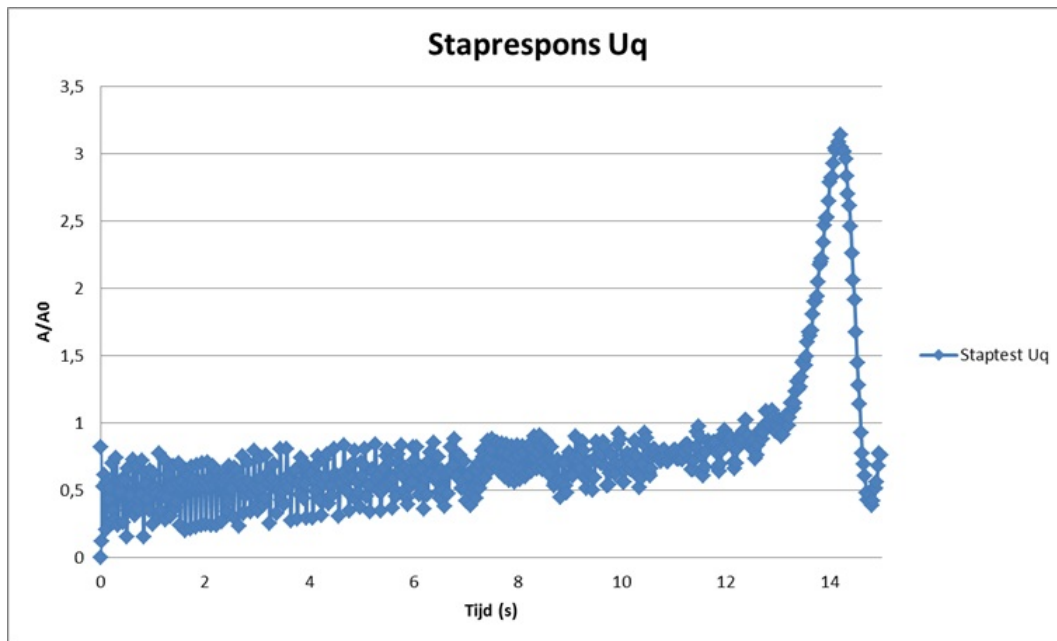
Figuur 4.28: Staprespons Ud 0-1A 3050rpm



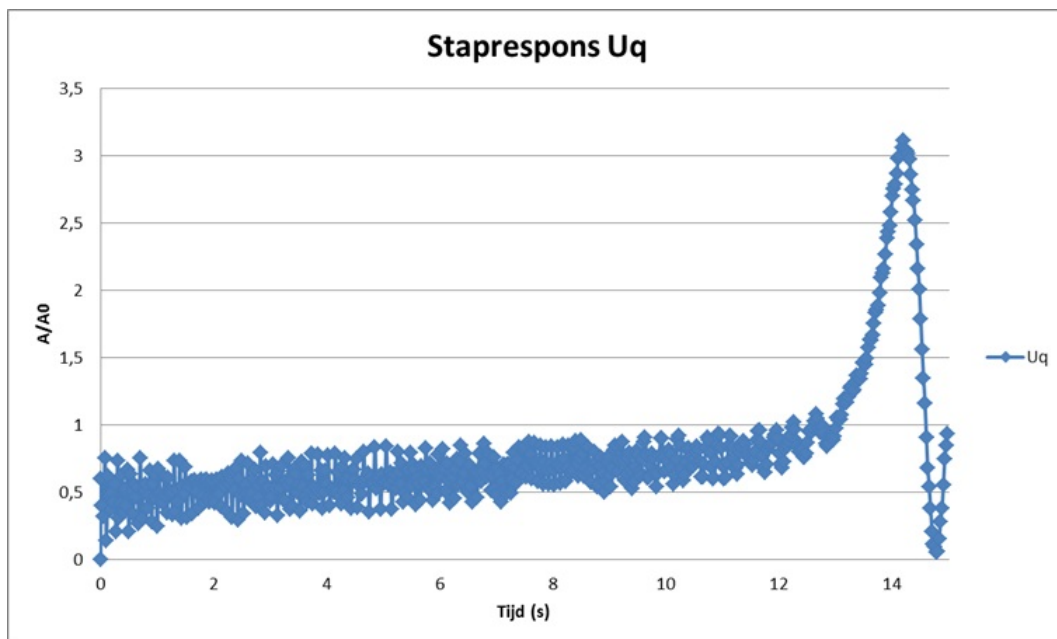
Figuur 4.29: Staprespons Ud 0-1A 3100rpm

Ook de parameter ' U_q ' in figuren 4.30 en 4.31 toont foutmarges van 50 à 60%. Verder vertonen de parameters ' U_d ' en ' U_q ' een tegengesteld verloop. Waar ' U_q ' aan het begin schommelt rond 0,5 onder de gewenste waarde, schommelt ' U_d ' 0,5 boven de gewenste waarde. In het achterhoofd houdend dat deze ingestelde stroom zich ver bevindt van de nominale stroom die de motor nodig heeft. Het magnetisch veld voor de motor moet worden opgebouwd alvorens er actieve stroom kan vloeien. Parameter ' U_q ' is dan wel een spanningscomponent, maar wordt bepaald door de stroomregellus (zie paragraaf 3.4.2). De piek voor ' U_q ' valt net voor de piek van ' U_d '.

De trage reactietijd wordt verklaard omdat de motor in het begin geen koppel heeft. Eenmaal dat verzadiging opgetreden is reageert deze wel.

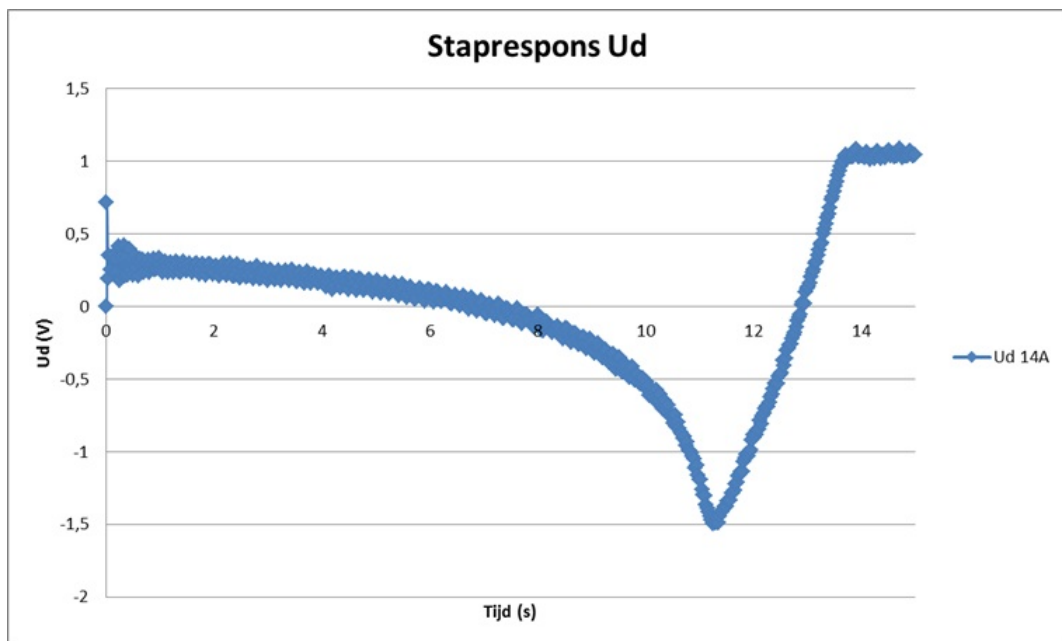


Figuur 4.30: Staprespons Uq 0-1A 3050rpm

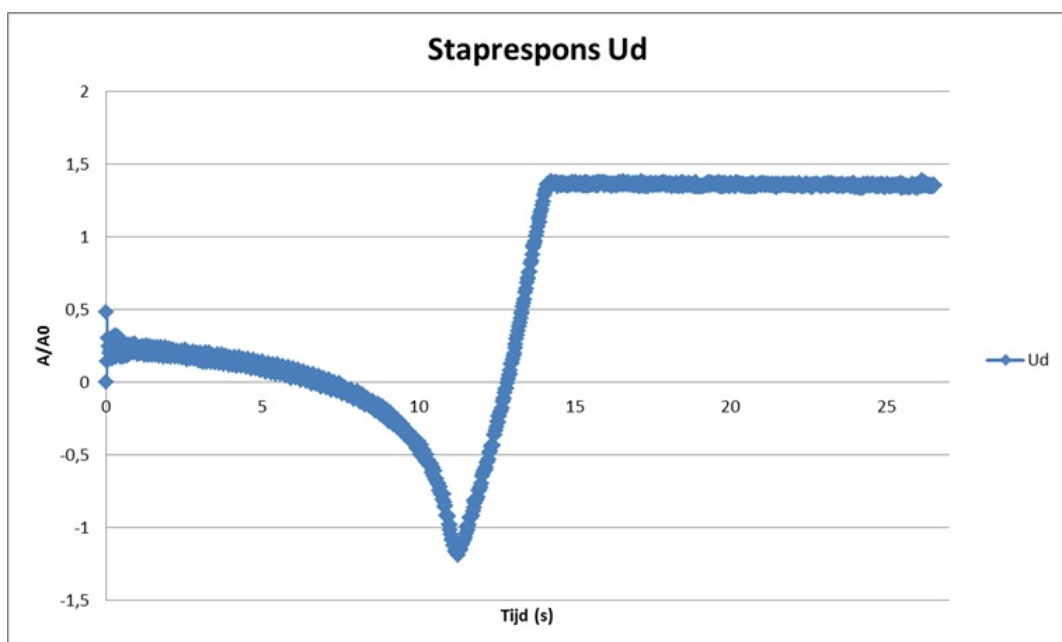


Figuur 4.31: Staprespons Uq 0-1A 3100rpm

Dit verloop komt ook terug bij een stap van 0 naar 14A ingestelde stroom (figuren 4.32, 4.33, 4.34 en 4.35). Eerst komt de piek van 'Uq' voor het veld, waarna 'Ud' volgt. Ook hier moet het veld nog opgebouwd worden, wat de lange responstijd verklaart. Net zoals bij eerdere metingen is er minder speling op de meetwaarden naarmate de stromen groter worden (minder foutpercentage op de metingen). Ook de overshoot bij een stap naar een hogere stroom is meer dan een factor 2 kleiner, terwijl de responstijd om opnieuw in regime-toestand te komen ongeveer hetzelfde blijft (14 seconden). Verder lijken 'Uq' en 'Ud' beiden beter te reageren bij 3050rpm.



Figuur 4.32: Staprespons Ud 0-14A 3050rpm

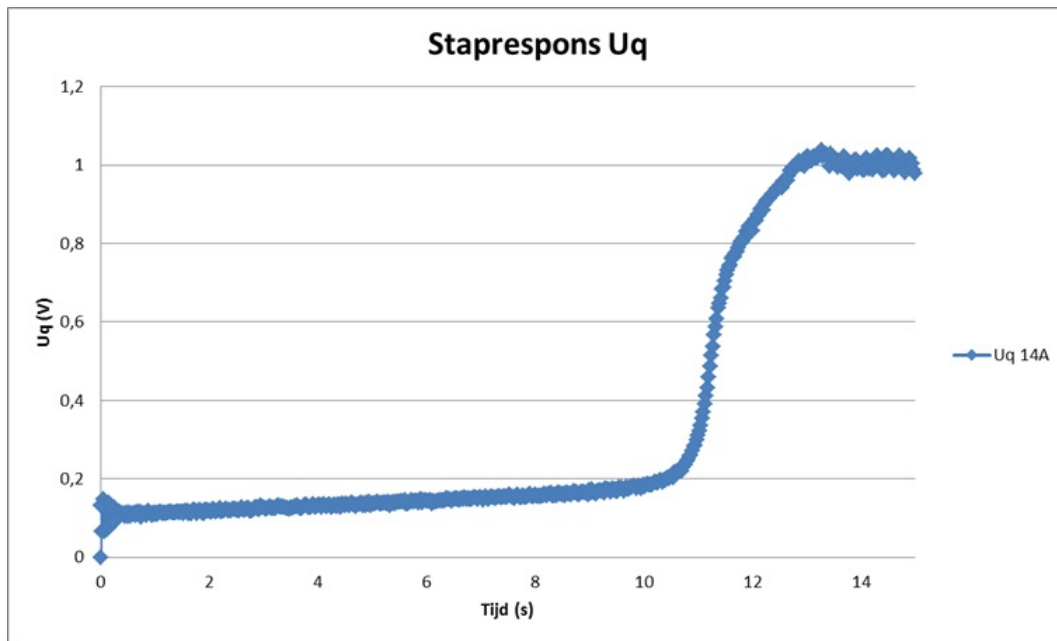


Figuur 4.33: Staprespons Ud 0-14A 3100rpm

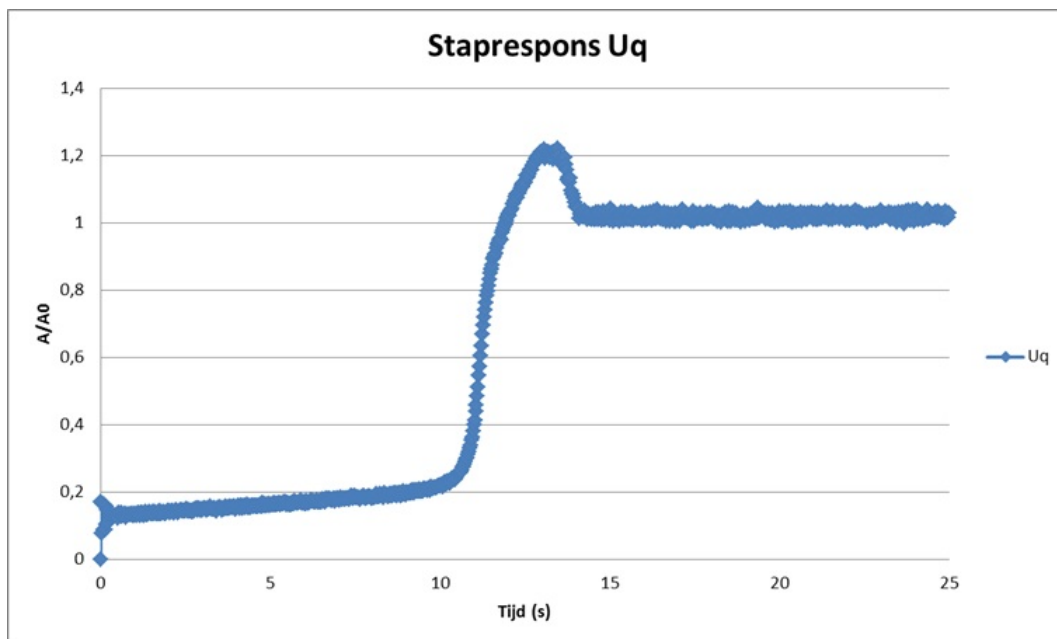
Tot slot kan gesteld worden dat uit het eerste gedeelte van de grafieken van reeks2 een beter resultaat gehaald wordt wanneer:

- een laag toerental ingesteld wordt bij een lage stroom;
- een hoog toerental ingesteld wordt bij een hogere stroom.

Dit leidt tot een nieuwe reeks metingen met variabel toerental.



Figuur 4.34: Staprespons Uq 0-14A 3050rpm



Figuur 4.35: Staprespons Uq 0-14A 3100rpm

4.3.3 Lineariteit bepalen a.d.h.v. 3050-3100rpm

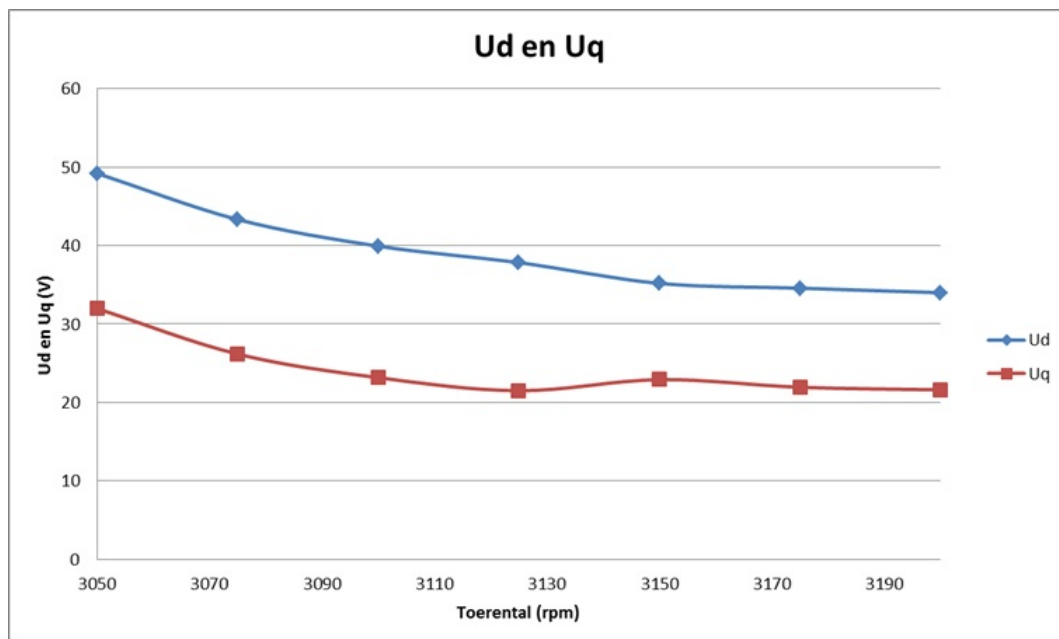
In de twee voorgaande secties (4.3.1 en 4.3.2) werd het toerental constant gehouden en de stroom in o.a. stappen van 1A gewijzigd. In deze reeks (4.3.3) wordt het toerental opgevoerd in stappen van 25rpm en wordt de stroom constant gehouden. Deze meting wordt herhaald voor stromen van 1, 2, 5, 10 en 14A.

Deze reeks diende in eerste instantie om te bepalen tot bij welk toerental de grootste variatie optreedt bij zowel 'Ud' als 'Uq'. Waarna er linearisatie toegepast werd tussen deze punten.

Na de implementatie van de lineariteit (punt 4.3.4) werden deze grafieken omgezet naar de samengestelde totale uitgangsspanning van de inverter en de hoek ϕ . Er wordt hierop teruggekomen in punt 4.3.5.

Figuur 4.36 toont de grootste verandering van 'Ud' en 'Uq' bij een constante stroom van 1A tussen 3050 en 3075 rpm.

Tabel 4.1 toont 3 kolommen. De 1^{ste} geeft de hier constante, ingestelde stroom weer.



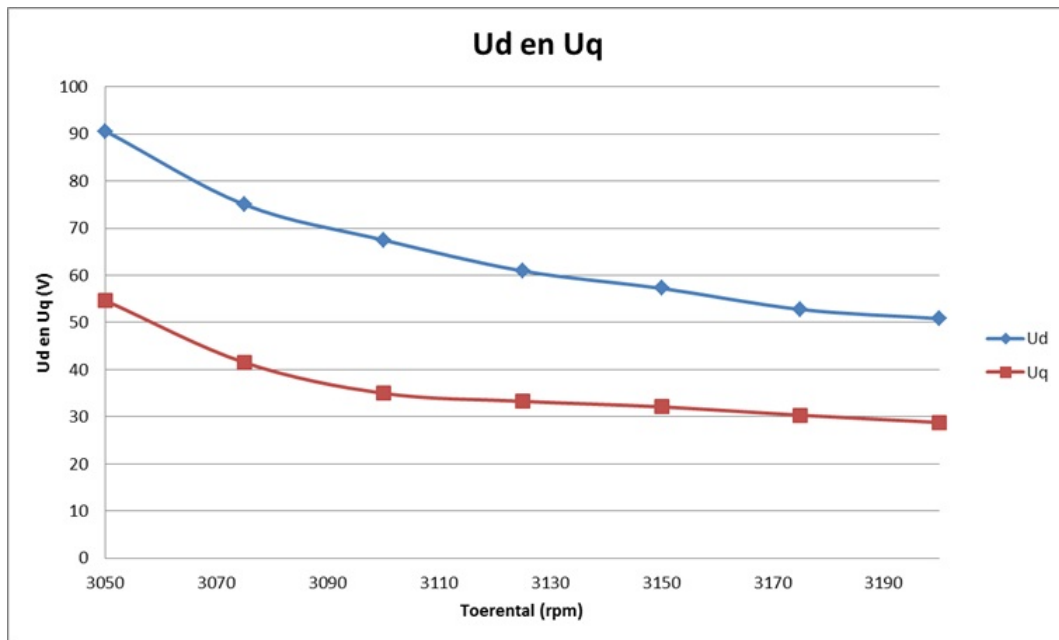
Figuur 4.36: Linearisatie 1A U_d en U_q

De 2^{de} geeft aan tot welk toerental op de grafiek een grote variatie in stroom geeft. De 3^{de} wordt bekomen door de variatie in toerental te delen door de gewenste stroomsbereik. Door hier het begintoerental bij op te tellen bekomen we het toerental dat het meeste stroomverandering heeft. Het toerental bereik $3125 - 3050 = 75$ wordt bekomen door het toerental te nemen van het snijpunt uit figuur 4.40 en te verminderen bij het begintoerental 3050. Daarna wordt het toerental bereik gedeeld door het stroombereik $14A - 1A = \Delta I = 13A$. In formules:

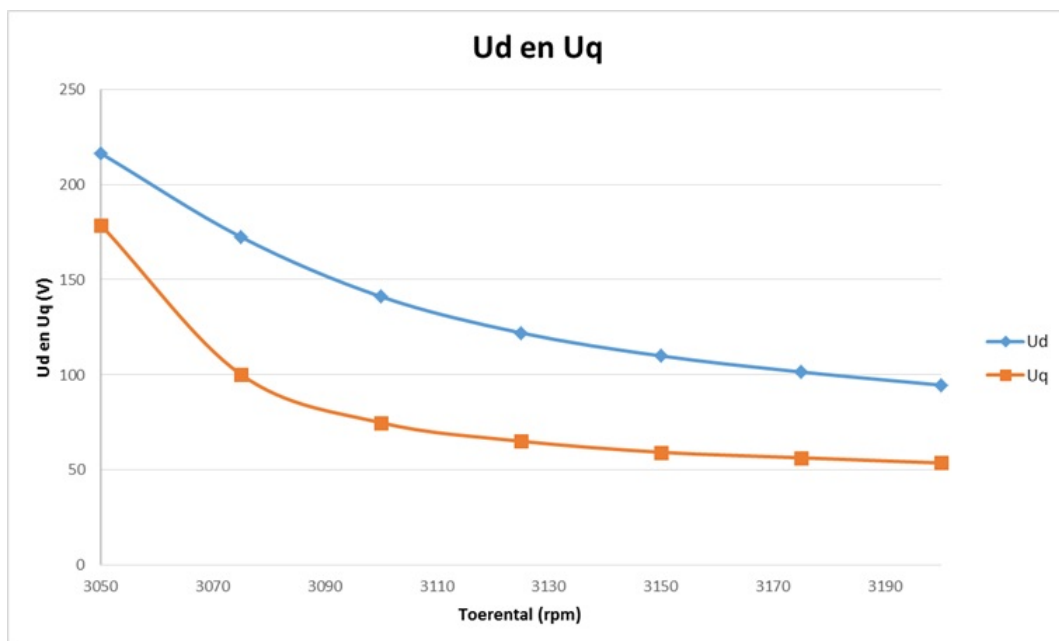
$$Verband = \frac{\Delta toerental}{\Delta stroom} = 5,77 \quad (4.1)$$

Stroom	figuur	$3050 + 5.77 * \text{Stroom}$
1A	3050	3050
5A	3075	3073
10A	3066	3107
14A	3140	3125

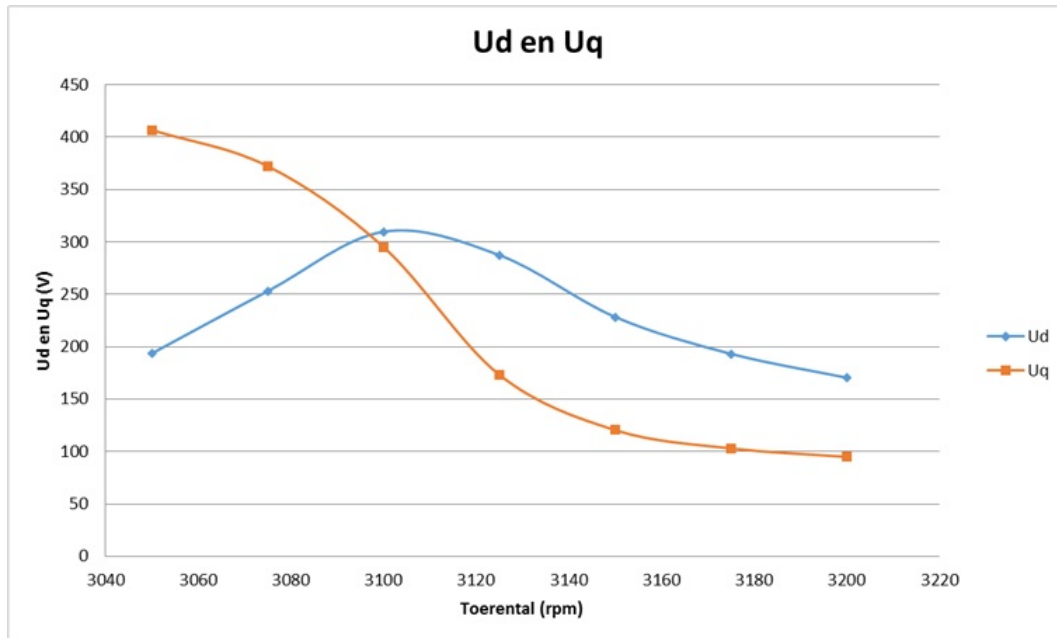
Tabel 4.1: Linearisatie punten i.f.v. ingestelde stroom



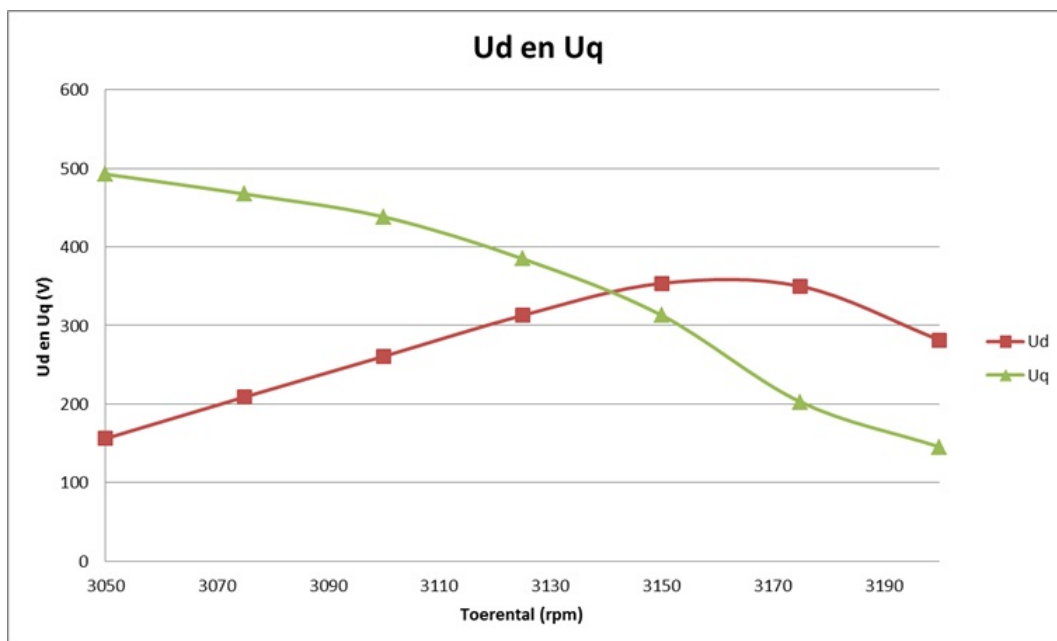
Figuur 4.37: Linearisatie 2A U_d en U_q



Figuur 4.38: Linearisatie 5A U_d en U_q



Figuur 4.39: Linearisatie 10A U_d en U_q

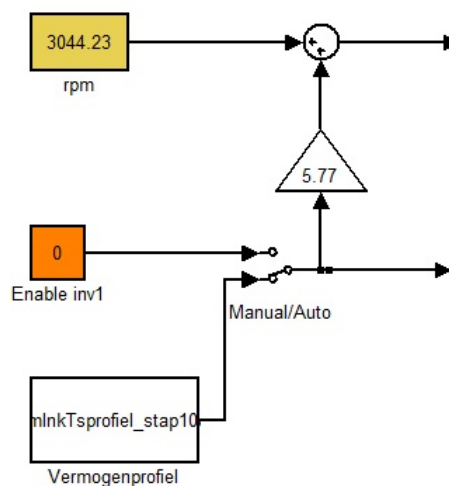


Figuur 4.40: Linearisatie 14A U_d en U_q

4.3.4 Implementatie lineariteit

De implementatie met lineariteit is opgebouwd uit vorige sectie waar de lineariteit bepaald werd. Deze reeks bevat een variabel toerental en variabele stroom. In reeks 3 werd het beginpunt van 1A gekozen op 3050rpm. Figuur 4.41 toont hoe de implementatie gebeurt in het Simulink model. Om de lineariteit te behouden zoals in reeks 3 bepaald werd, dient op 0A begonnen te worden op 3044rpm. Er werd in reeks 3 begonnen op 3050rpm bij 1A en om bij 0A dezelfde lineariteit te bekomen dient men 3050 te verminderen met $1 * 5,77$. Men bekomt dan het begintoerental van ongeveer 3044rpm bij 0A. Verder is er een switch toegevoegd om makkelijk te kunnen wisselen tussen het afspelen van een profiel en een constante waarde voor de stroom.

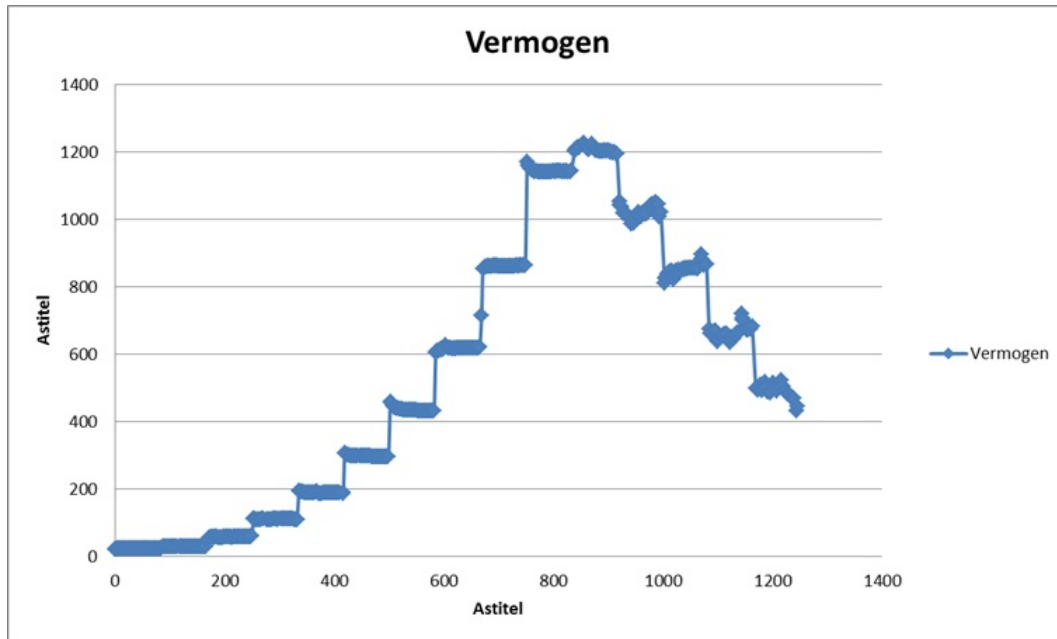
De metingen die gelogd worden binnen het model (parameters als U_q , U_d , ..) starten gelijk met de opstart van het model. Deze tijden gelijk laten lopen met de stroom en toerentalveranderingen heeft er voor gezorgd dat het model gelijk wordt opstart met de simulatie. Het is dus niet zo dat het simulatiemodel al kan worden opgezet (runmode), en dan na een bepaalde tijd het schema kan 'enabled' worden. Dit loopt in de metingen gelijk. De grafieken op de



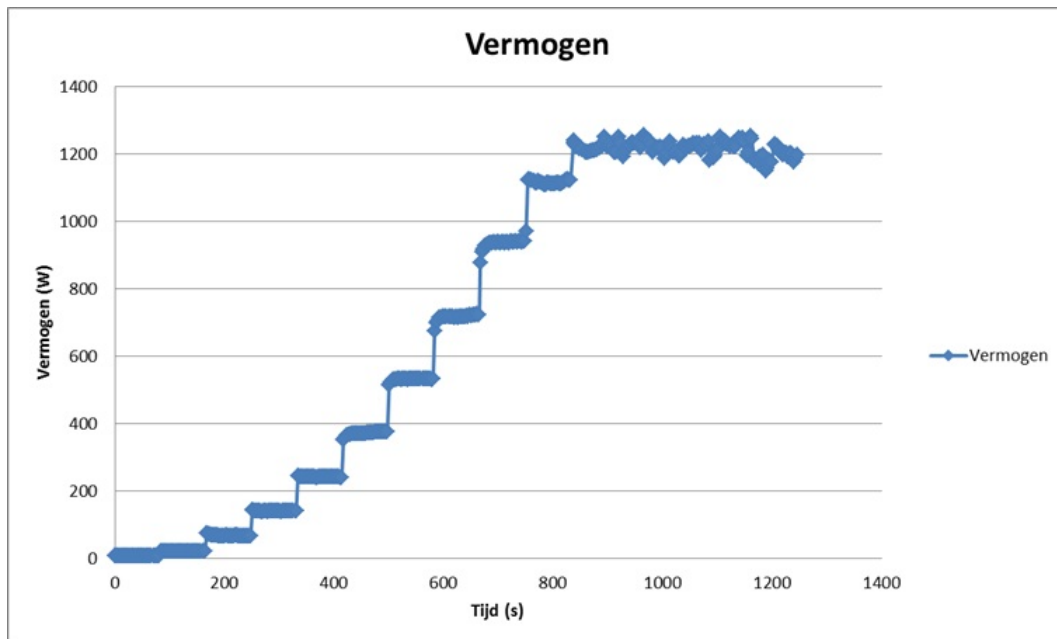
Figuur 4.41: Implementatie lineair verband

komende pagina's zijn zo opgebouwd dat de eerste figuur een grafiek toont van reeks 1 of reeks 2 en de grafiek eronder hetzelfde toont met implementatie van het variabel toerental.

Als eerste voorbeeld worden figuren 4.42 en 4.43 met elkaar vergeleken. Beide grafieken tonen het verloop van het vermogen naar de motor i.f.v. de tijd en dus ook de ingestelde stroom. Deze laatste wordt met stappen van 1A verhoogd. Er valt op dat met variabel toerental het vermogen niet meer terug naar onder zakt. Het neemt weliswaar ook niet meer toe, wat eigenlijk het gewenste effect zou zijn.

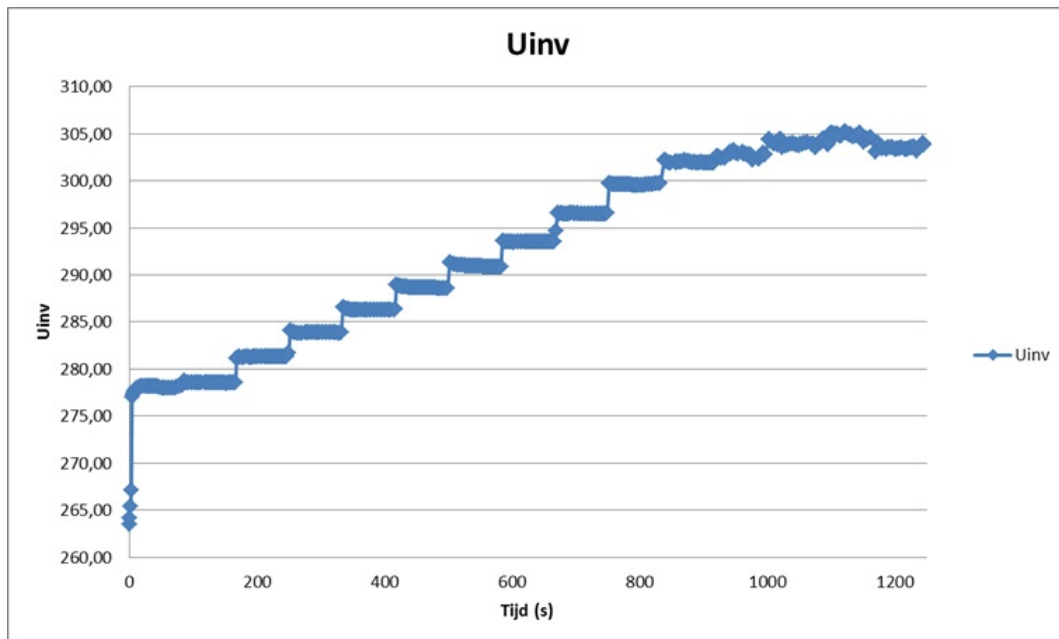


Figuur 4.42: Invertervermogen 0-14A Stap 1A 3200 rpm

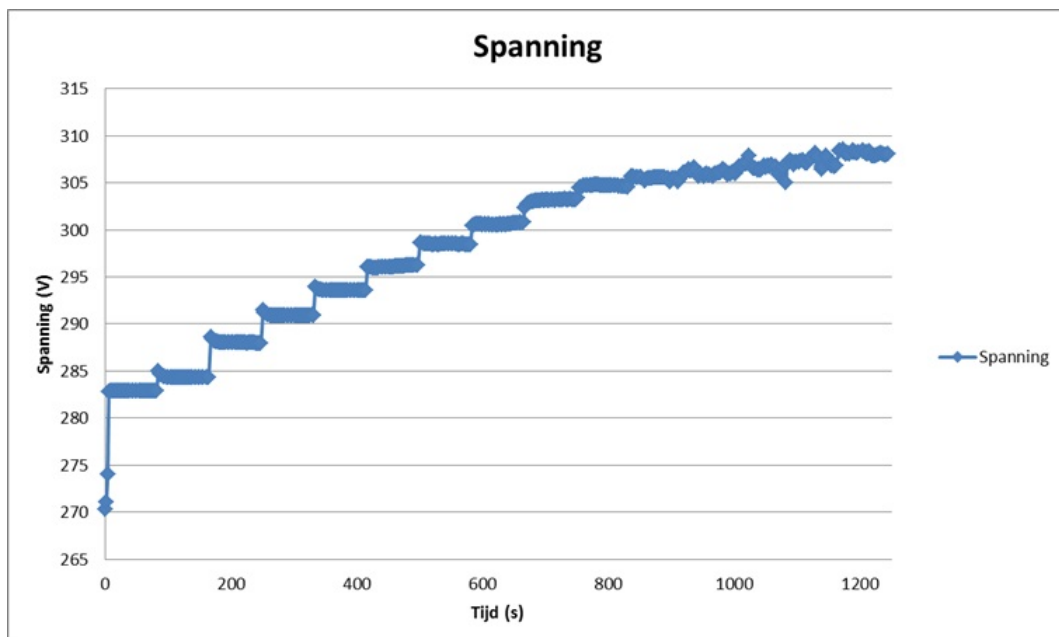


Figuur 4.43: Invertervermogen 0-14A Stap 1A Var. rpm

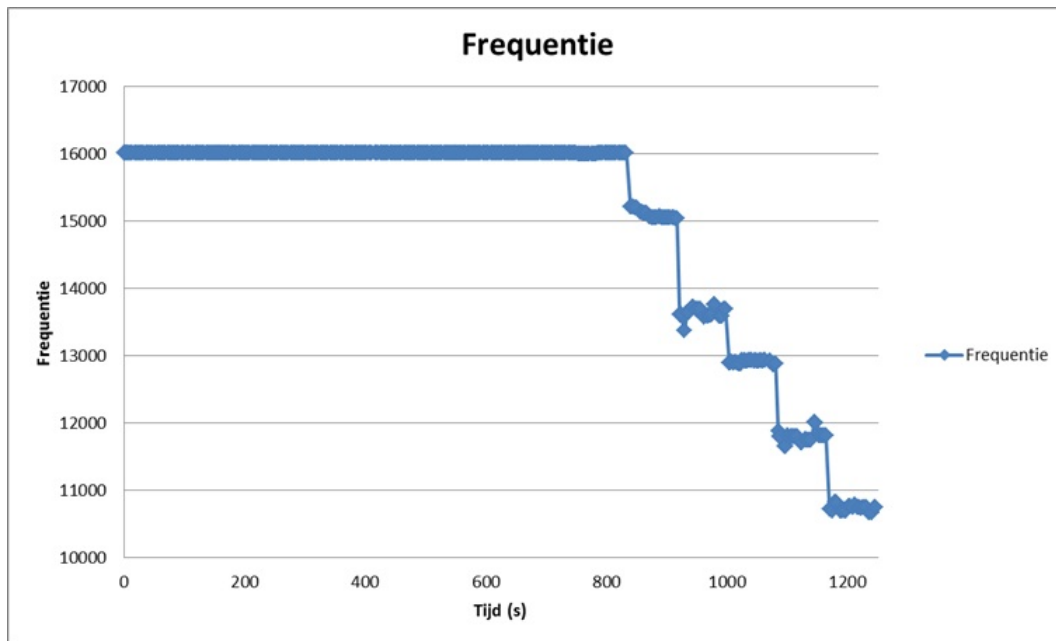
Figuren 4.44 en 4.45 tonen hetzelfde verloop voor de spanning. De spanning neemt in figuur 4.45 iets langer toe dan in figuur 4.44. Deze spanning is een samengestelde spanning rechtstreeks afkomstig van de inverter en onrechtstreeks opgebouwd uit 'Ud' en 'Uq' (zie verder). Het actief gedeelte Ud, is in verhouding met de totale spanning groter dan in figuur 4.44, waardoor deze langer kan stijgen. Wanneer het actief gedeelte van de spanning een grotere proportie inneemt, verklaart dit ook het verloop van het vermogen in voorgaande figuren.



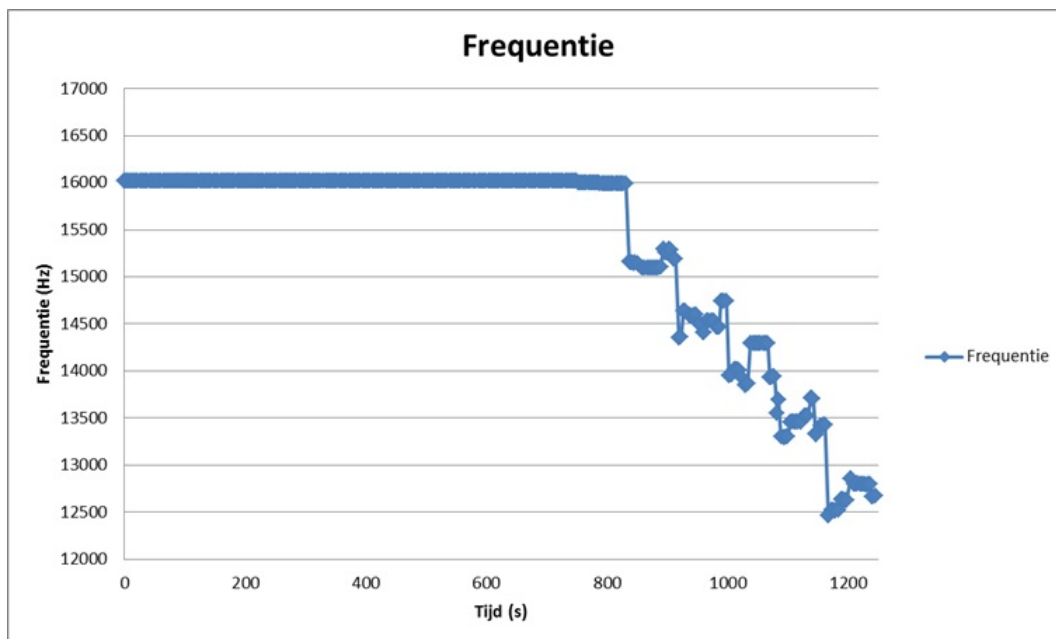
Figuur 4.44: Inverterspanning 0-14A Stap 1A 3200 rpm



Figuur 4.45: Inverterspanning 0-14A Stap 1A Var. rpm

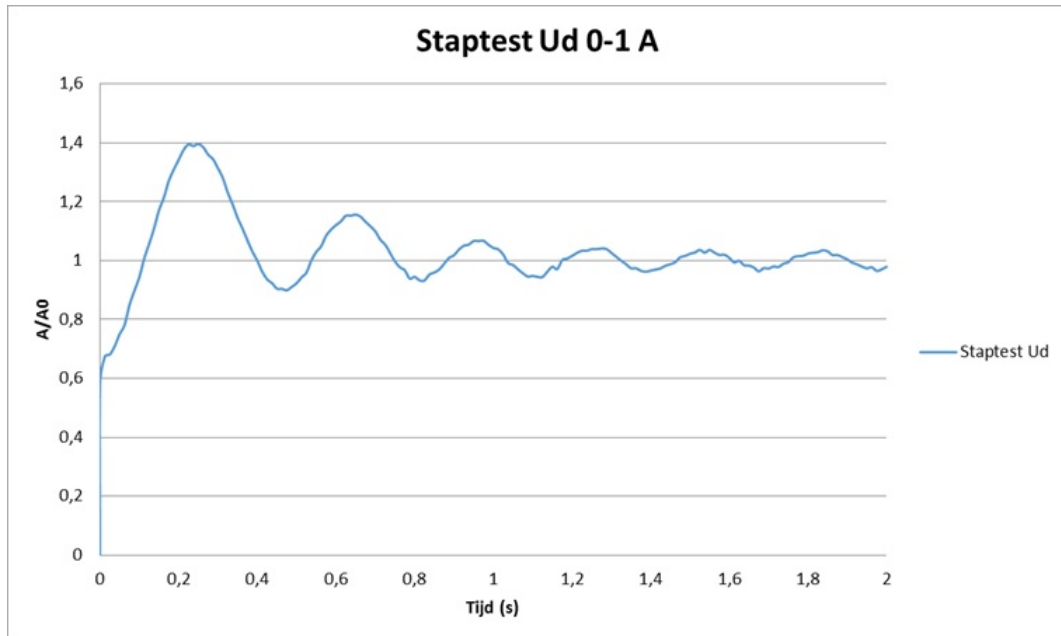


Figuur 4.46: Inverterfrequentie 0-14A Stap 1A 3200 rpm

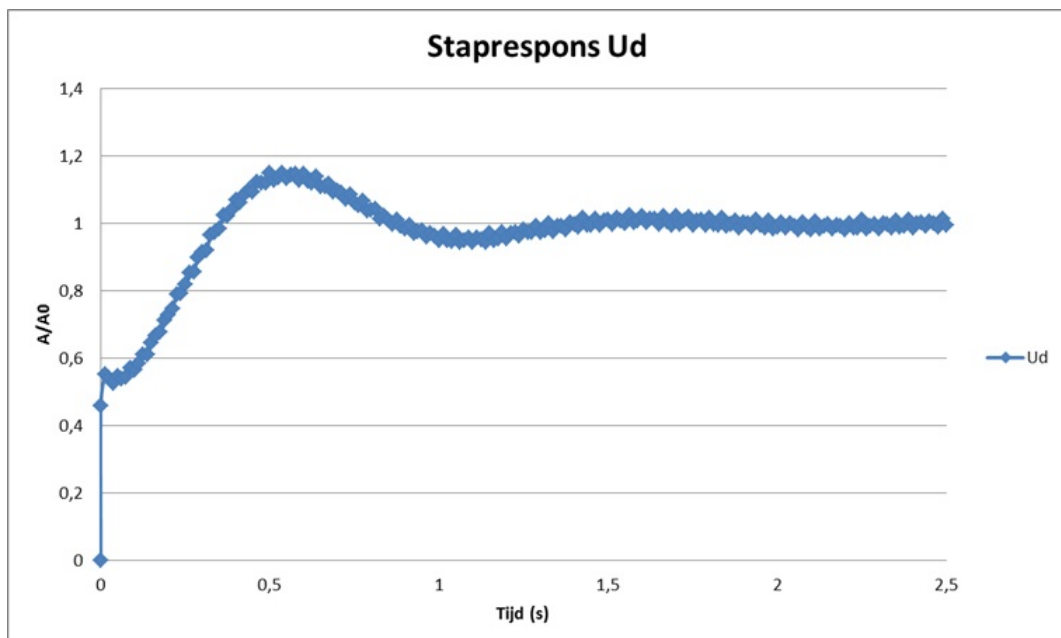


Figuur 4.47: Inverterspanning 0-14A Stap 1A Var. rpm

Figuren 4.48 en 4.49 tonen de staprespons van Ud bij respectievelijk 3200 en variabel toerental bij een stap van 0 naar 1A. De overshoot is minder dan de helft en de slingering is minder. Wat zeker zo belangrijk is, de tijd waarmee de gewenste waarde bereikt wordt ligt nog altijd rond de seconde. Er is qua snelheid hier geen winst geboekt.

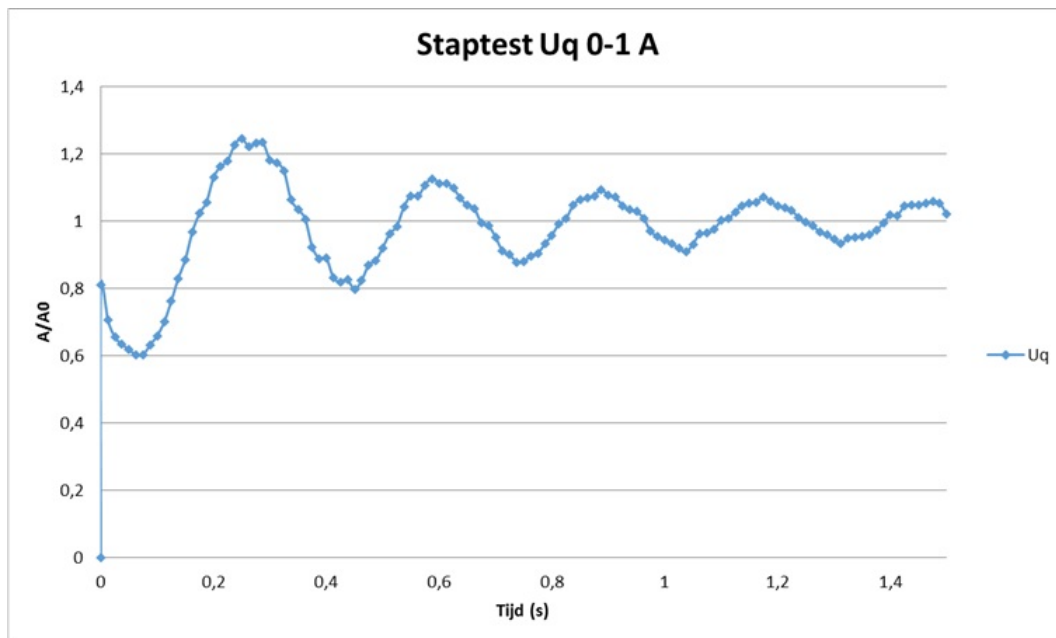


Figuur 4.48: Staprespons Ud 0-1A 3200 rpm

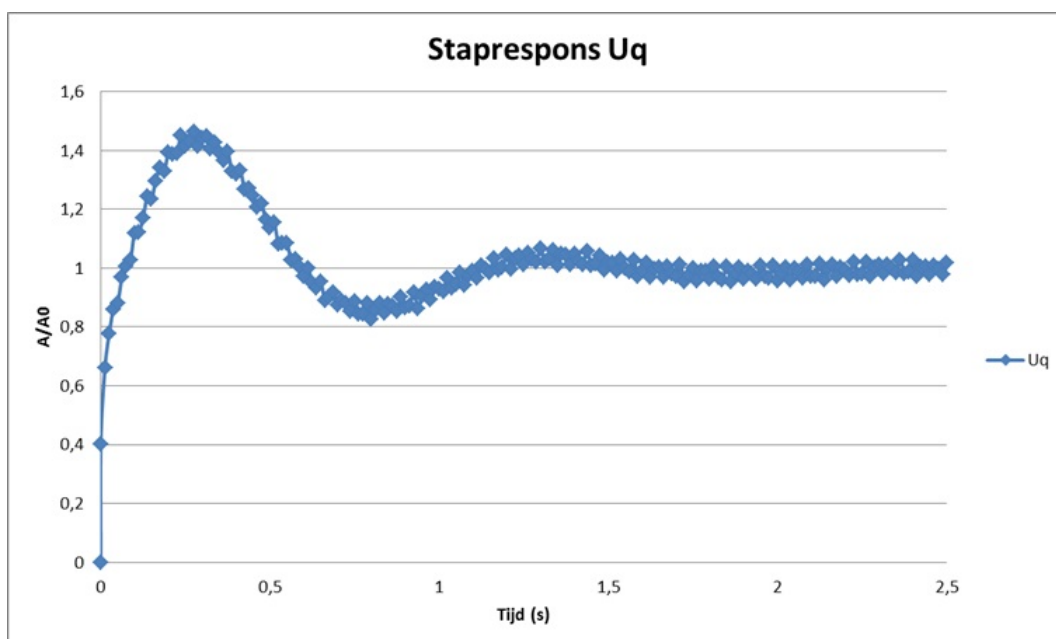


Figuur 4.49: Staprespons Ud 0-1A Var. rpm

Ook voor de figuren 4.50 en 4.51 wordt er voor parameter 'Uq' qua snelheid geen tijdswinst geboekt. Wel is er ook hier 50% minder overshoot en minder slinging. Net als in reeks 2 neemt eerst 'Uq' toe en daarna 'Ud' met ongeveer 0,25 seconden verschil tussen de overshootpieken.

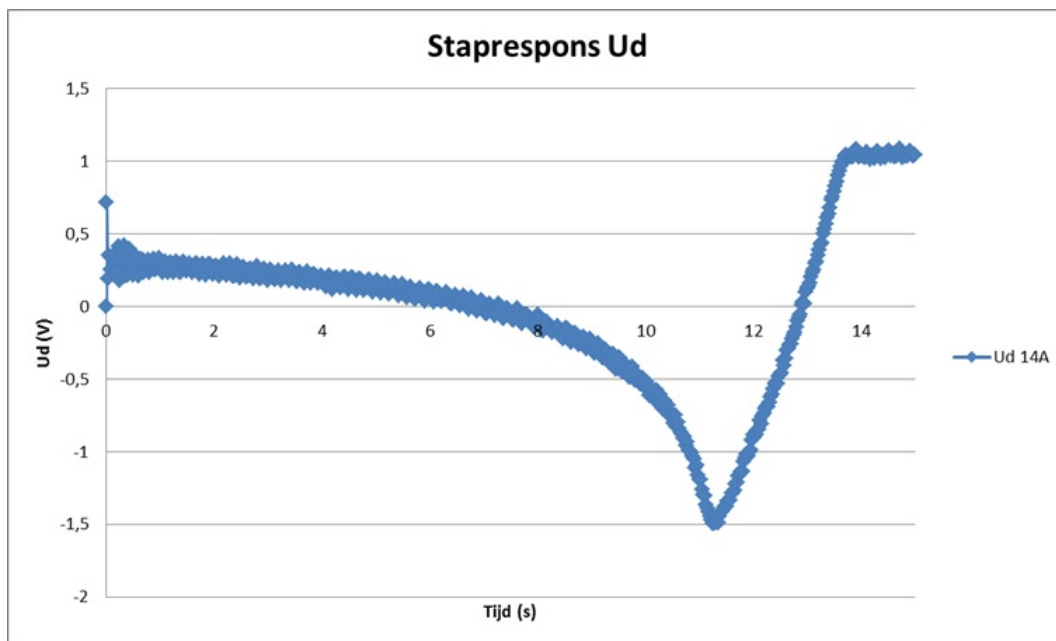


Figuur 4.50: Staprespons Uq 0-1A 3200 rpm

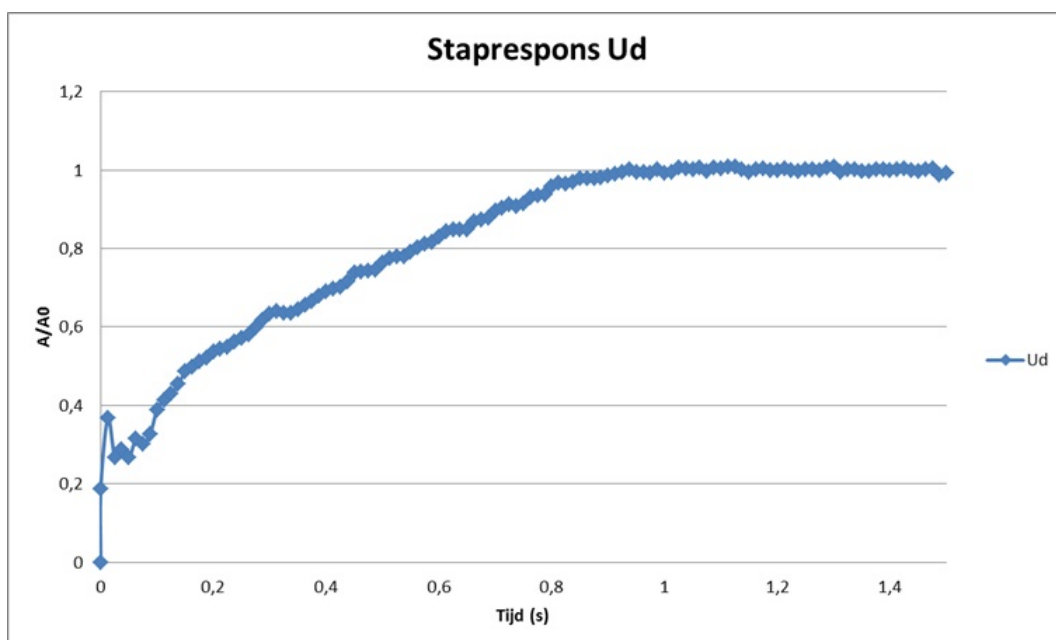


Figuur 4.51: Staprespons Uq 0-1A Var. rpm

Van de volgende 6 grafieken, komen telkens de eerste uit de reeks van 3050rpm. In reeks 1 werd nog niet ingegaan op stapresponsies van 14A in een keer. De grafieken er onder tonen telkens weer dezelfde stapresponsie met variabel toerental. De eerstvolgende grafiek (figuur 4.52) toont dus de staprespons 'Ud' uit reeks2. Door deze grafiek te vergelijken met figuur 4.53 valt op dat in de plaats van negatief te gaan, de grafiek nu positief blijft. De nieuwe grafiek toont bijna eerste orde gedrag. Zeker noemenswaardig is het tijdsverschil waarop men de eindwaarde bereikt. Let hierbij op want de tijdsassen verschillen. Figuur 4.53 behaalt de eindwaarde in 1 seconde terwijl dit bij 3050rpm pas na 13,5 seconde gebeurde. Verder is er geen overshoot merkbaar.

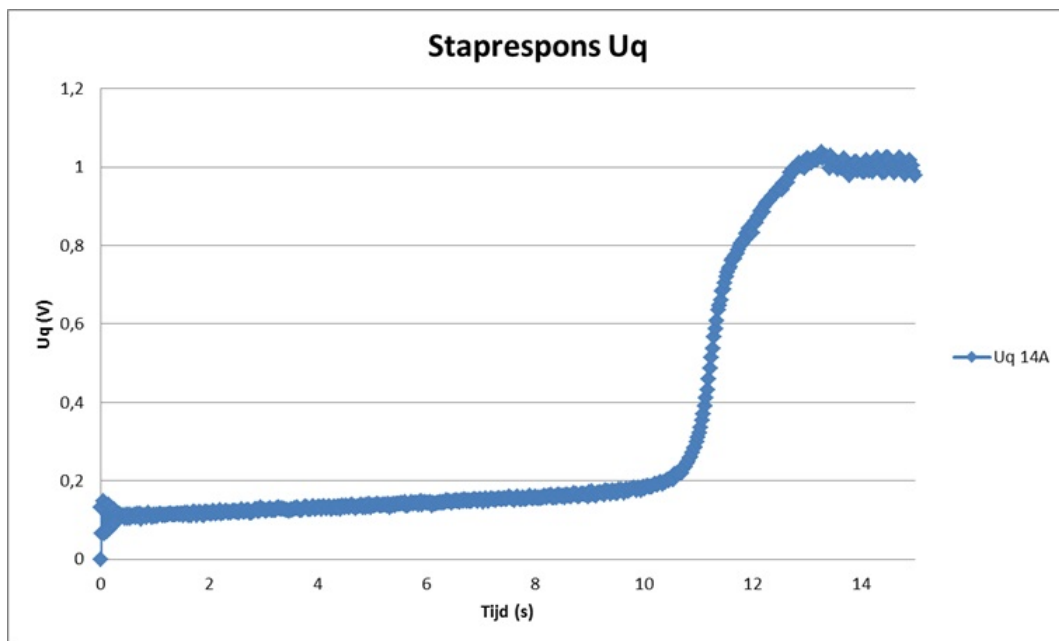


Figuur 4.52: Staprespons Ud 14A 3050 rpm

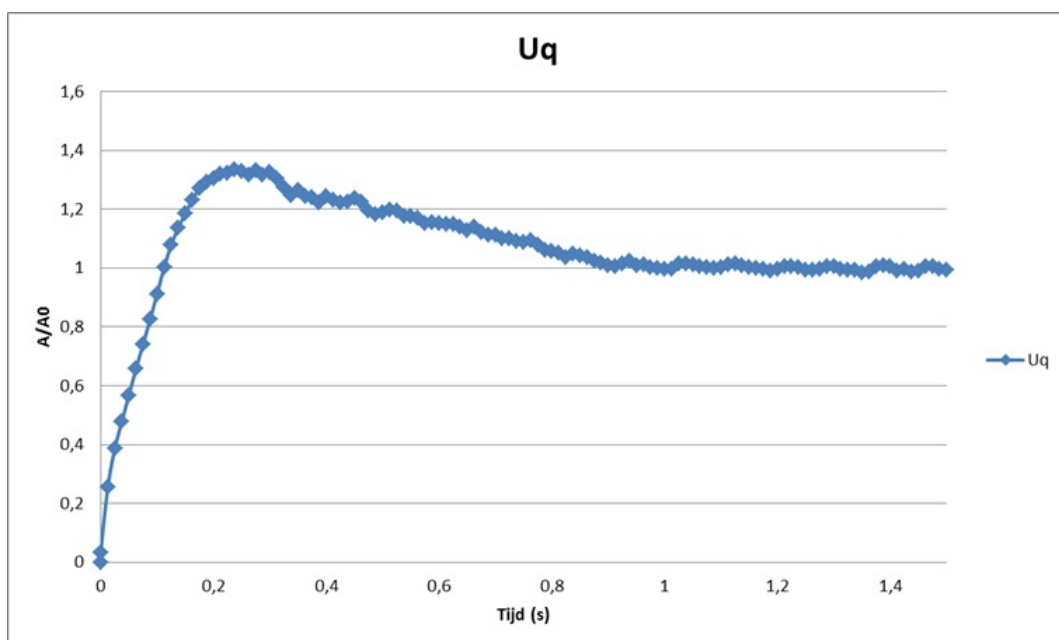


Figuur 4.53: Staprespons Ud 14A Var. rpm

Bijna hetzelfde fenomeen komt terug voor parameter 'Uq'. Figuren 4.54 en 4.55 tonen het curveverloop. In het geval met variabel toerental wordt ook hier de eindwaarde bereikt na 1 i.p.v. 13 seconden. De curve 'Uq' met variabel toerental toont in dit geval wel overshoot van 35% maar vertoont verder amper nog slingering.

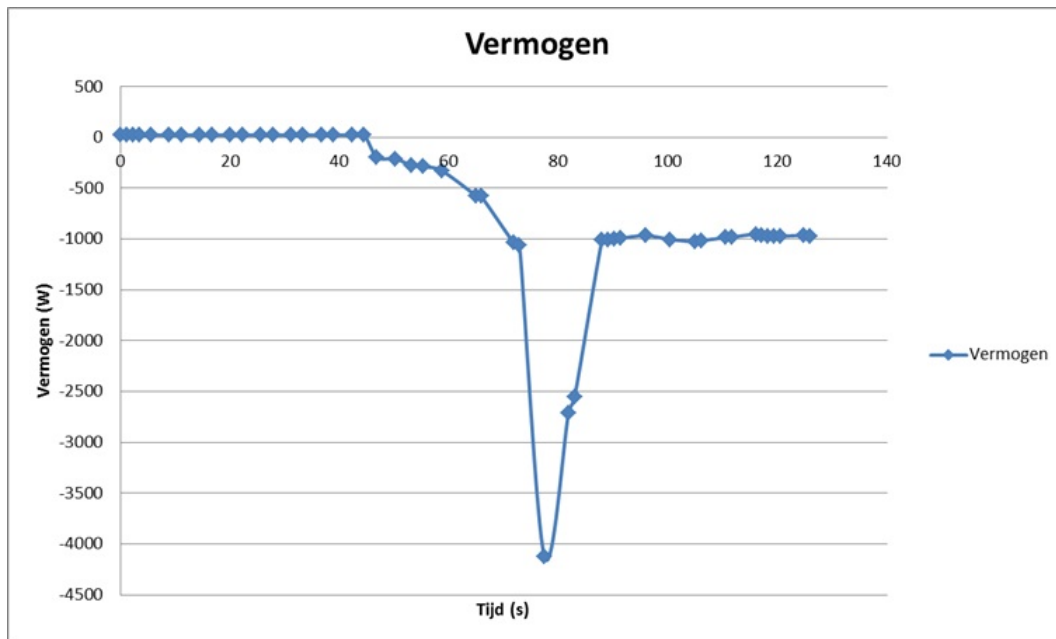


Figuur 4.54: Staprespons Uq 14A 3050 rpm

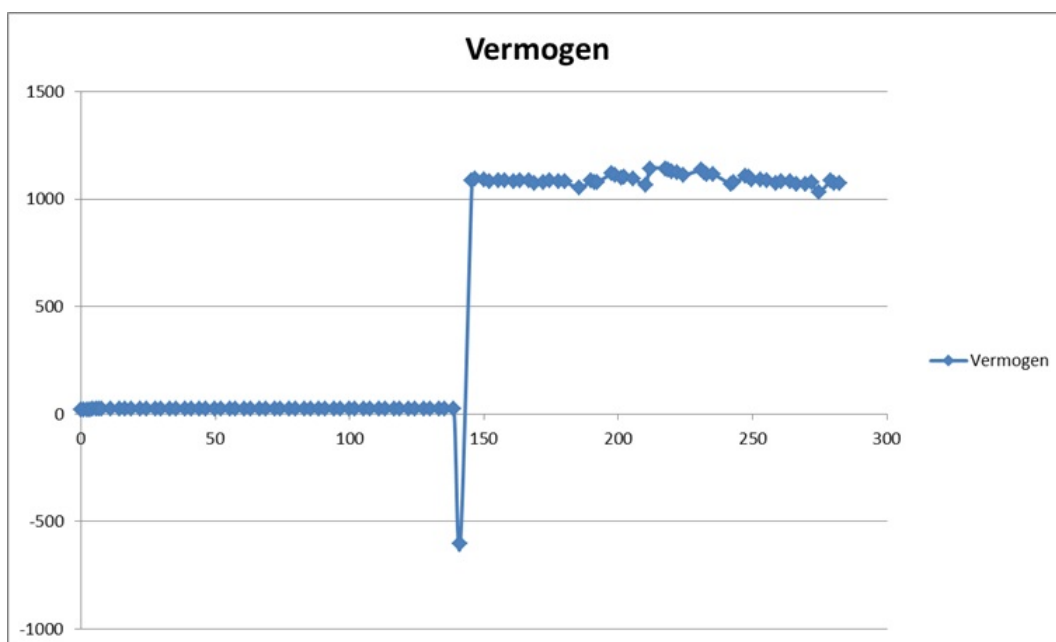


Figuur 4.55: Staprespons Uq 14A Var. rpm

Tot slot tonen figuren 4.56 en 4.57 de stapresponsie van het vermogen. Er werd in figuur 4.56 een sprong gemaakt van 0 naar 14A na 45 seconden. Dezelfde sprong werd uitgevoerd in figuur 4.57 na 140 seconden. In het eerste geval verandert de curve van teken en blijft deze negatief. In het 2de geval wordt de aangelegde stroom, en dus vermogen nagenoeg onmiddellijk gevolgd (4-5 seconden). Het gewenste vermogen wordt echter niet bereikt vanwege verzadiging.



Figuur 4.56: Vermogen Stap 0-14A 3050 rpm



Figuur 4.57: Vermogen Stap 0-14A Var. rpm

4.3.5 Resultaat

De verschillende metingen kunnen onderverdeeld worden in vier reeksen:

Reeks 1 : Vast toerental 3200rpm

Reeks 2 : Vast toerental 3050 en 3100rpm

Reeks 3 : Lineariteit bepalen a.d.h.v. van reeks2

Reeks 4 : Implementatie lineariteit, variabel toerental i.f.v. stroom

Met variëren van het toerental is de stroomregeling geoptimaliseerd, de overshoot is kleiner, de slingering is minder. De reactietijd blijft echter ongeveer dezelfde bij lage ingestelde stromen. Voor hoge ingestelde stromen is de snelheidswinst significant groter (13x sneller). De ingestelde stroom wordt gevolgd door de motor. Het grootste deel wordt echter omgezet in reactieve stroom en de motor wordt in verzadiging gestuurd. De emulaties kunnen best uitgevoerd worden tot een maximum stroom van 10A.

Na de opbouw van reeks 4 met variabel toerental en variabele stroom werden de grafieken van reeks 3 herbekeken.

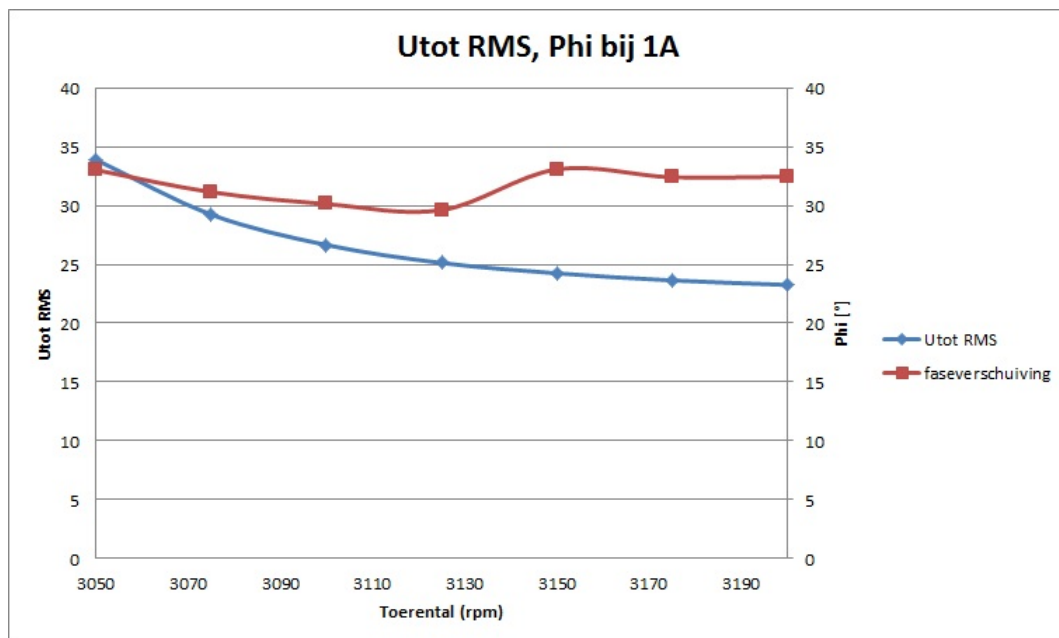
Samengestelde spanning en hoek ϕ

Zoals eerder vermeld in sectie (4.3.3) kunnen de spanningen U_d en U_q samengesteld worden tot een totaalspanning. Ook de fasehoek tussen beide spanningen kan bepaald worden. In formules:

$$U_{tot} = U_d^2 + U_q^2 \quad (4.2)$$

$$\phi = \frac{180}{\Pi} * \arctan\left(\frac{U_q}{U_d}\right) \quad (4.3)$$

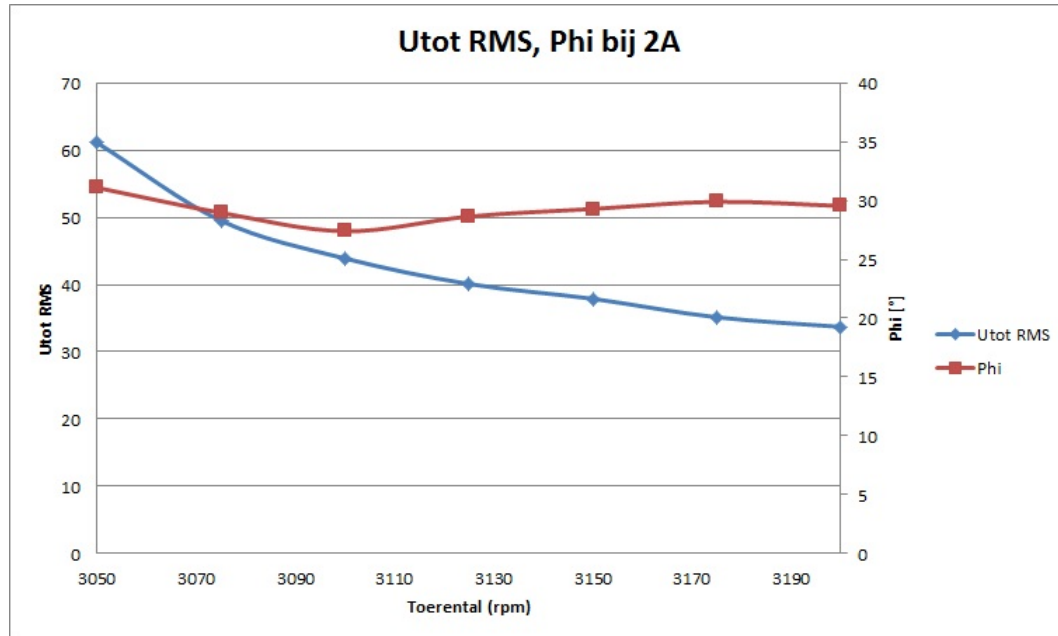
Dit grafieken met U_d en U_q hebben weinig nut voor de interpretatie van het vermogen en de spanning naar motor. Een heruitvoering met volgende grafieken voor de linearisatie zou een beter resultaat moeten geven. In figuur 4.58 kunnen we zien dat de spanning bijna 35V



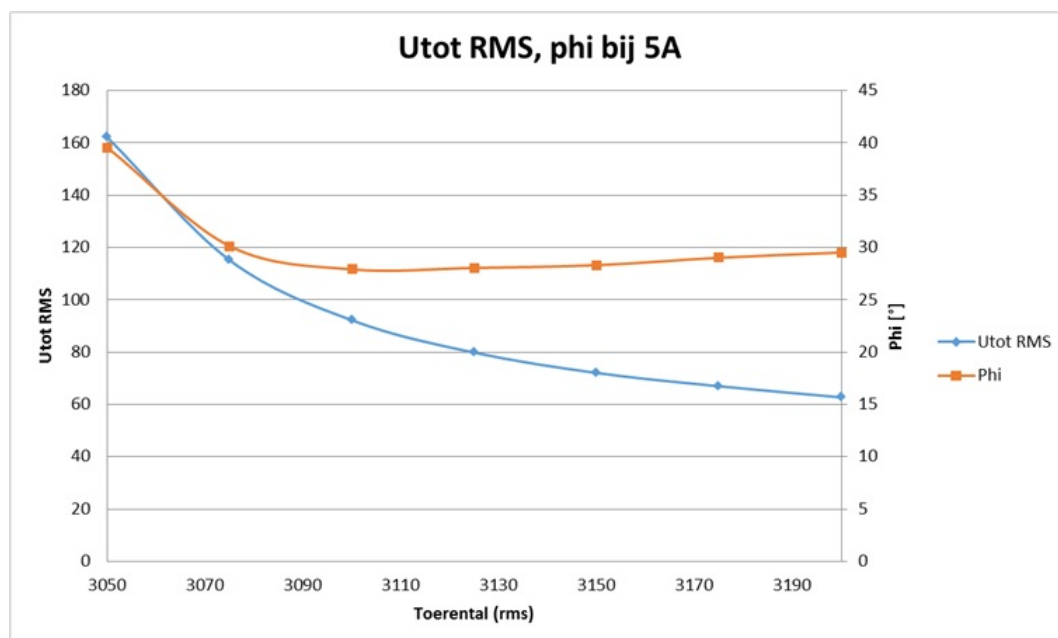
Figuur 4.58: Linearisatie 1A

bedraagt bij 3050rpm en 1A. Deze spanning mag hoger liggen om de motor bij opstart van meer koppel te voorzien. Om hiertoe te komen kan het toerental lager genomen worden dan 3050rpm.

Ook in figuur 4.60 en 4.60 valt op te merken dat de motor niet de nominale spanning haalt en dus het toerental lager mag liggen. De fasehoek van ongeveer 30° blijft bij 1A (figuur 4.58) en bij 2A (figuur 4.59) constant. De arbeidsfactor van de motor bedraagt 0,7 en bij nominaal bedrijf zou de motor een faseverschuiving hebben van 45° . In figuur 4.60 waar 5A ingesteld is, zien we dat de fasehoek begint toe te nemen bij lage toerentallen.



Figuur 4.59: Linearisatie 2A

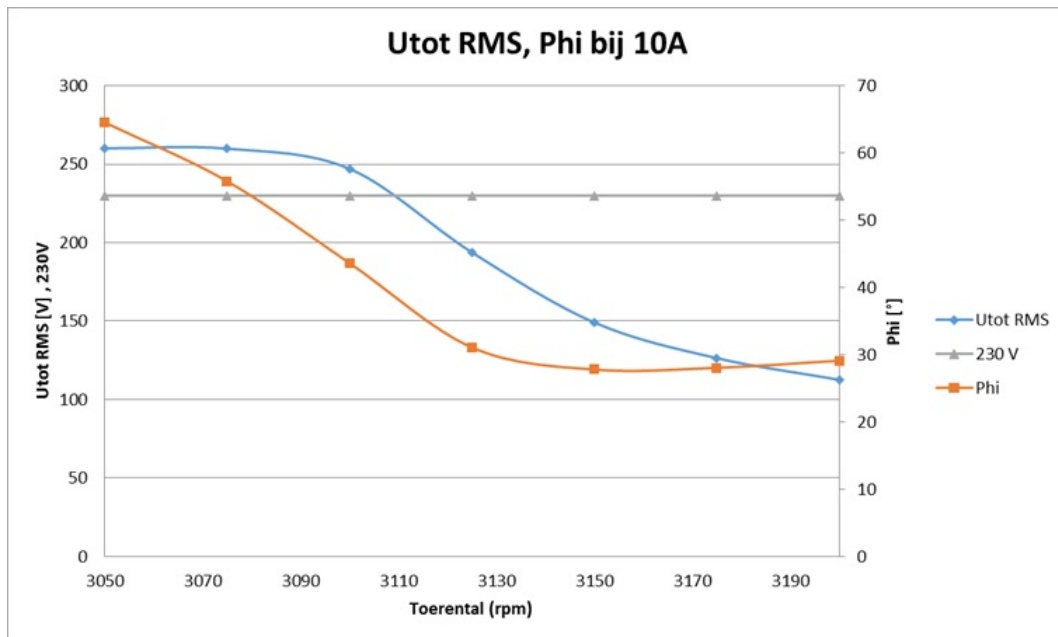


Figuur 4.60: Linearisatie 5A

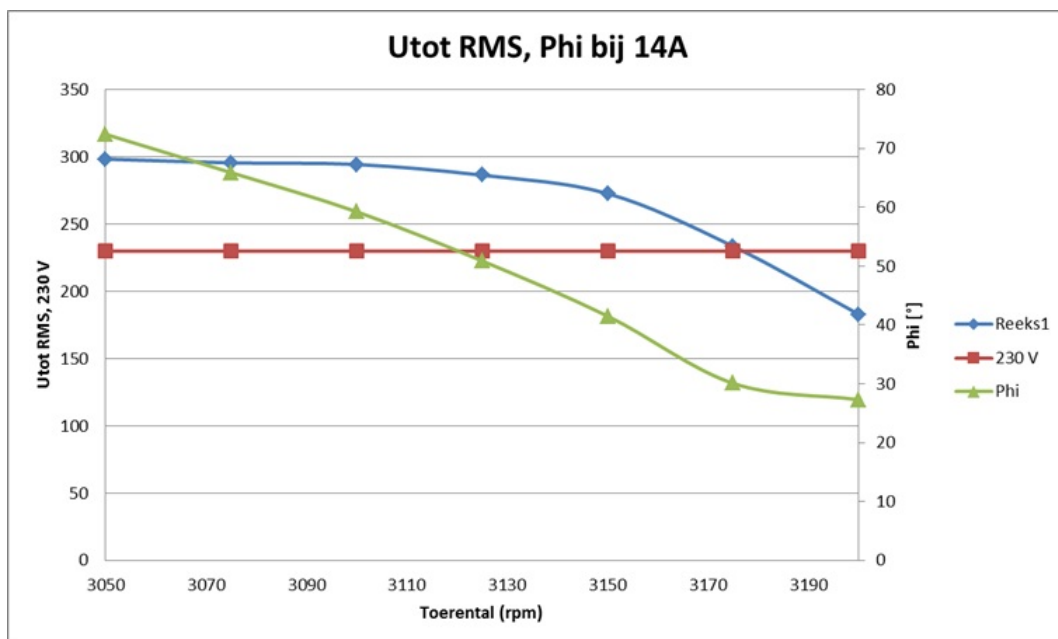
Figuur 4.61 is te zien dat de spanning bij toerentallen 3050 tot ongeveer 3110rpm zich boven nominaal bevindt. De motor zit hier in verzadiging. 3110 à 3120rpm lijkt in deze grafiek de meest optimale toestand met een kleine faseverschuiving en zo groot mogelijke spanning.

In figuur 4.62 met 14A zakt de spanningsgrafiek pas naar 230V bij ongeveer 3180rpm. Ook de faseverschuiving zit een stuk beter bij dit toerental.

Er kan geconcludeerd worden dat de spanning vanaf het begin al naar 230V mag om



Figuur 4.61: Linearisatie 10A



Figuur 4.62: Linearisatie 14A

koppel op te bouwen bij lage stromen (1 à 2A). Het toerental bij lage stromen mag dus

lager. Bij de hogere stromen mag het toerental duidelijk hoger liggen om verzadiging te voorkomen en om de fasehoek kleiner te houden.

4.4 Vermogen uit het net

4.4.1 Inleiding

Tot nog toe (reeks 4 en vorige) werd altijd de uitgang naar de motor toe geregeld i.f.v. het ingestelde stroomprofiel en het bijhorende toerental. Wat men eigenlijk wenst te regelen is het vermogen dat via de TVM opgenomen wordt uit het net. Daarvoor is het nodig een verband op te stellen tussen de ingestelde stroom en het vermogen opgenomen uit het net. Dit verband wordt gevonden door twee aanpassingen in de aansturing.

Ten eerste gaat er een bepaald actief vermogen verloren door de de TVM. Dit verlies wordt is afhankelijk van de ingestelde stroom en wordt gecompenseerd door offsetcorrecties. In formule:

$$P_{verlies}(I) = \frac{P_{inverter}(I) - P_{motor}(I)}{P_{inverter}(I)} \quad (4.4)$$

Ten tweede zorgt de ingestelde stroom niet voor enkel actieve energie. Het grootste deel van de energie naar de motor is reactieve energie. Niet enkel de actieve stroom maar de totaalstroom wordt teruggekoppeld waardoor men minder actief vermogen krijgt dan ingesteld. Verder moet ook rekening gehouden worden met de $\cos \phi$ van de motor. Tot slot kan de verhouding tussen het actief vermogen en het totale vermogen bepaald worden uit grafieken.

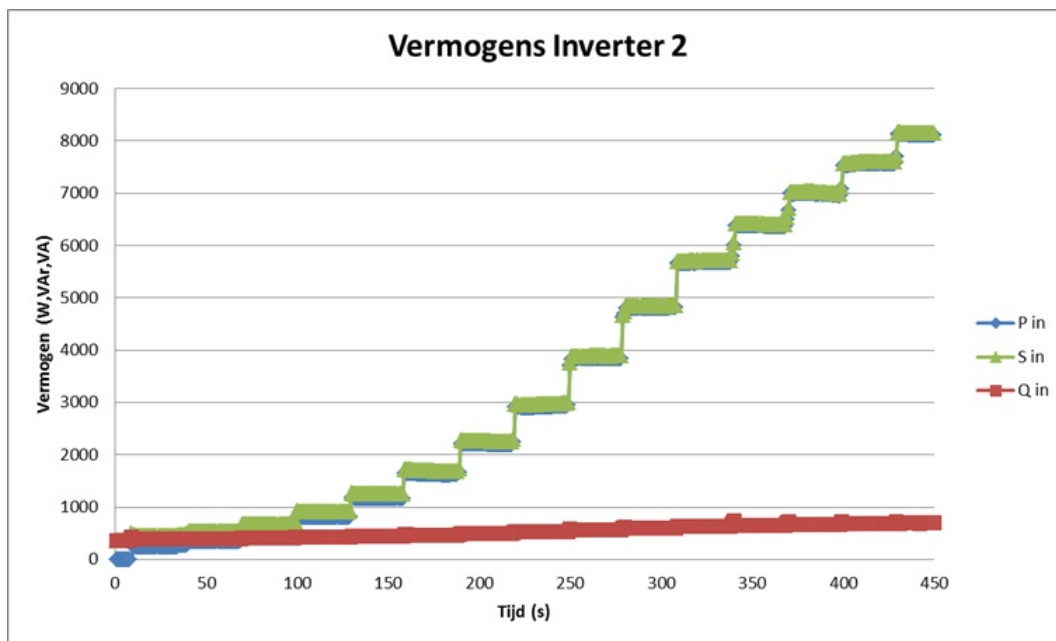
4.4.2 Vermogens in en uit

De vermogensgrafieken die volgen werden opgebouwd met de lineariteit zoals aangegeven in punt 4.3.3 en 4.3.4. Dit is dus niet met de mogelijk betere interpretatie met nieuwe grafieken die besproken werden in punt 4.3.5, met de totale spanning en de hoek Φ .

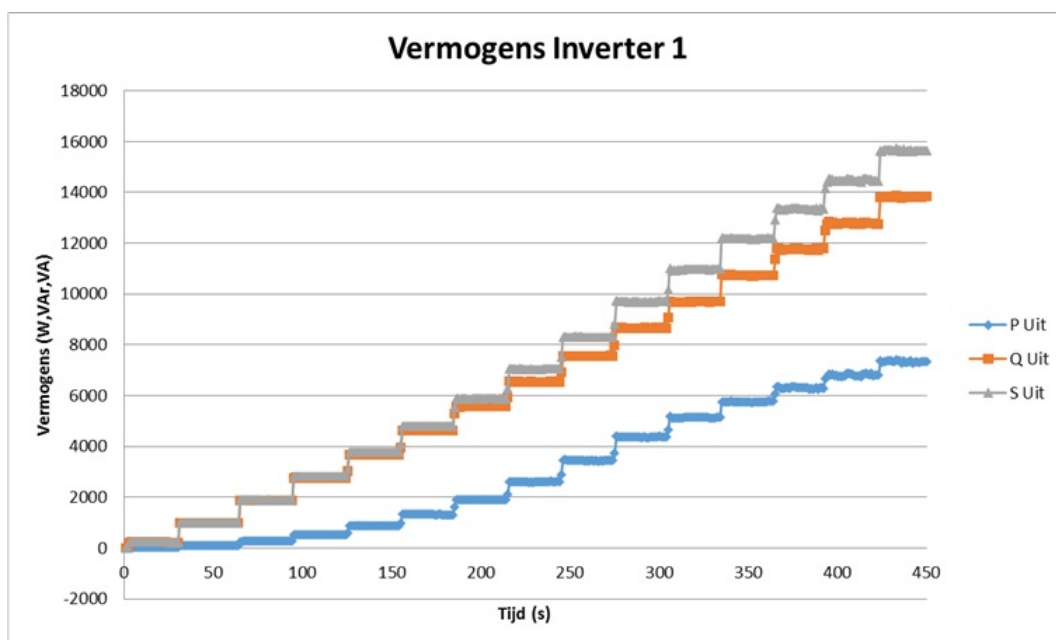
Figuur 4.63 toont het actief, reactief en totaal vermogen dat opgenomen worden uit het net via inverter 2. Ondanks dat in het aanstuurmodel de reactieve component op '0' wordt gezet, neemt de inverter toch een deel reactieve energie op. Dit blijft onder 10% bij de maximaal ingestelde stroom voor deze opstelling. De curves voor actief en totaal vermogen liggen nagenoeg op elkaar.

Figuur 4.64 toont het actief, reactief en totaal vermogen opgewekt door inverter 1. Uit

de figuur blijkt dat de reactieve energie het grootste deel uitmaakt. Zo heeft de AC-motor sowieso reactieve energie nodig om zijn veld op te bouwen.

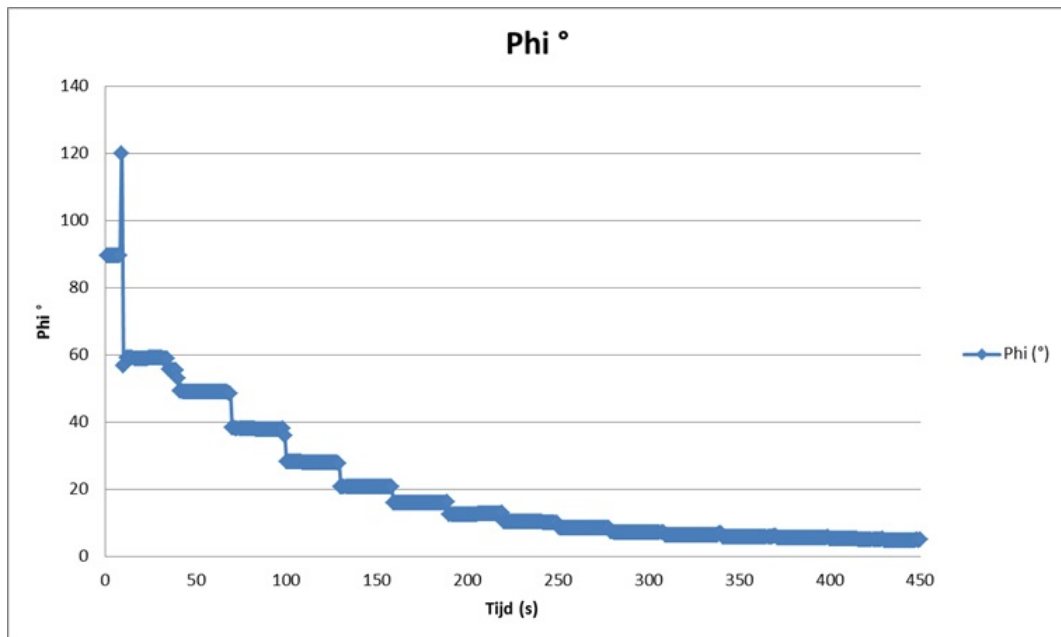


Figuur 4.63: Vermogens P,Q en S Inverter 2

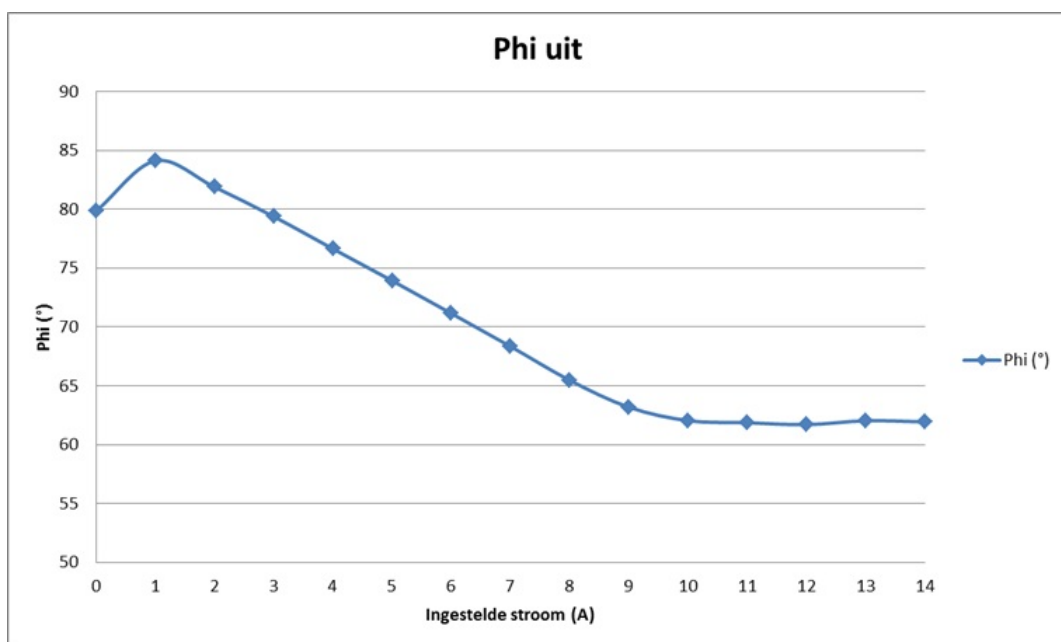


Figuur 4.64: Vermogens P,Q en S Inverter 1

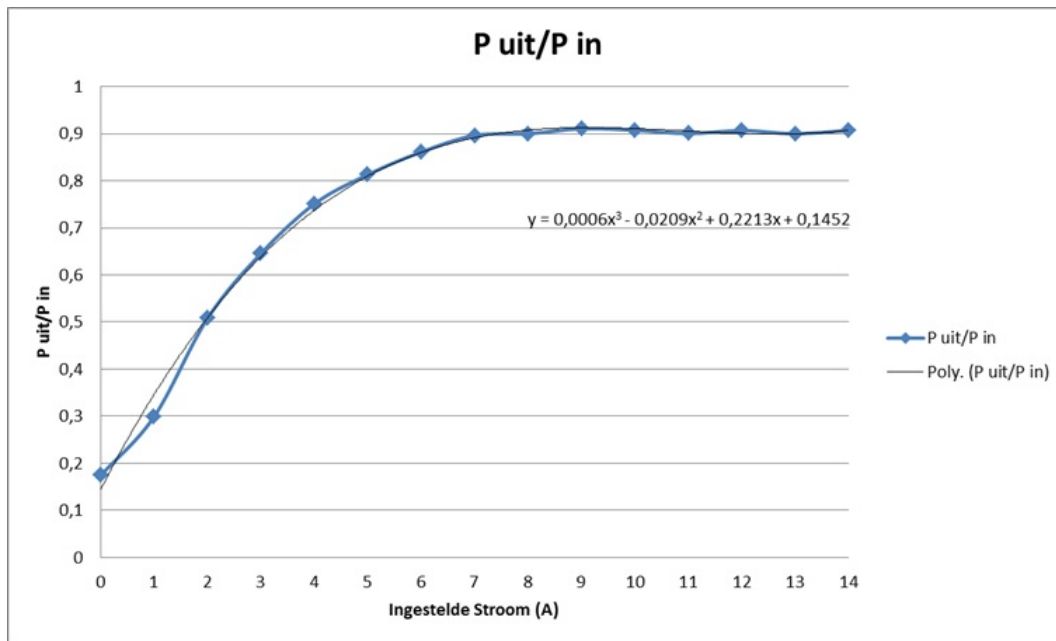
Figuur 4.66 toont de faseverschuiving van inverter 1. Deze is boven de nominale waarde van deze motor. Men moet wel bedenken dat de AC-motor hier gebruikt wordt in een dynamische toepassing terwijl het aanstuurmodel hier eigenlijk niet optimaal voor is.



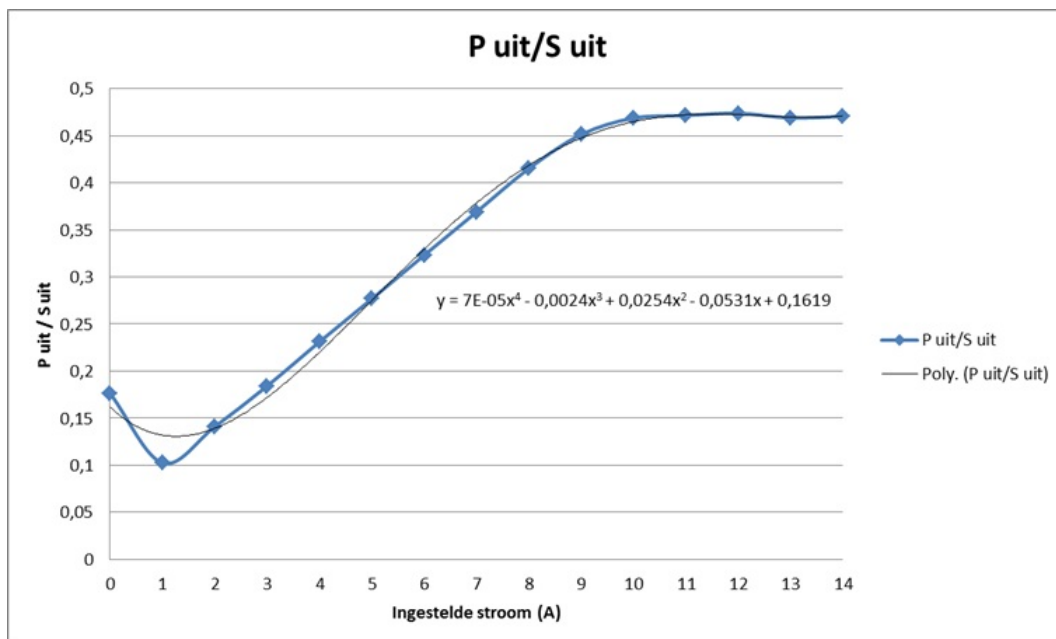
Figuur 4.65: Faseverschuiving phi inverter 2



Figuur 4.66: Faseverschuiving phi inverter 1



Figuur 4.67: Rendement inverter2



Figuur 4.68: Verhouding P/S inverter 1

Hoofdstuk 5

Conclusies proefopstelling

Het origineel concept voor deze masterproef, om twee TVM's koppelen bleek niet haalbaar om voornamelijk twee redenen.

- geen extra scheidingstransfo aanwezig achter de tweede TVM, deze kost was niet voorzien.
- aanstuurmodel 'PM15F30M30C' bezit niet de mogelijkheid om een actieve stroomcomponent 'Id' te sturen.

Wil men naar een opstelling voor vermogen te sturen met twee TVM's dan moet de extra transfo aangekocht worden en is een ander aanstuurmodel nodig. Dit kan aangekocht worden of eventueel zelf gemaakt. Dit laatste vereist een grondige kennis van Matlab Simulink, de achterliggende hardware en tijd. De opbouw van een zelf gemaakt model behoorde niet tot het bestek van deze thesis.

Enkelefasig vermogen sturen is als concept vrij snel weggefallen aangezien het aanstuurmodel 'PM15F30M30C' deze mogelijkheid niet bezit. Triphase beschikt over zulke modellen en kan deze, tegen betaling, ter beschikking stellen. Deze kost was echter niet voorzien.

De opstelling met één TVM en motor-generatorkoppeling biedt een alternatief. Ze lost de problemen van het origineel concept op door enerzijds te voorzien in een weliswaar, mechanische galvanische scheiding tussen beide netten. Anderzijds kan via het aanstuurmodel verder gewerkt worden met inverter 1. Daardoor kan de stroom en dus het vermogen geregeld worden.

De regeling via het model 'PM15F30M30C' is niet optimaal. Dit demomodel voor motorcontrole heeft eigenlijk de bedoeling om aan te tonen dat de Triphase module werkt. Verder bevat de regeling onderdelen van testen uit het verleden die niet meer gebruikt worden maar wel in het model staan. Dit maakt het geheel vrij complex. Daarnaast maakt het model geen gebruik gemaakt van U/f control noch FOC of FOCC. Er is in het model geen terugkoppeling van toerental, flux, slip of spanning waardoor een optimaal dynamische regeling uitblijft.

Een motormodel met FOC is veel beter te regelen en moet betere prestaties leveren qua vermogenoverdracht. De beschikbare modellen met FOC gaan uit van toerentalmeting. Bij gebruik van dergelijk model dient een analoge inleeskaart bij aangesloten te worden op de PLC en een tachometer op de motor.

De alternatieve opstelling werd geoptimaliseerd met een variabel toerental. Zo zijn de reactietijden bij de grootste stroomsprongen 13 keer verkleind. Bij kleine stroomsprongen boekt met geen winst qua reactietijd. De overshoot en uitslingertijd dalen dan weer wel in beide gevallen.

Vanaf een ingestelde stroom van 10A stuurt het aangepaste aanstuurmodel meer dan 230V naar de motor. De motor geraakt hierdoor in verzadiging waardoor geen extra actief vermogen gestuurd kan worden. Dit is een ongewenst effect en was zonder variabel toerental sterker aanwezig. De verzadiging kan verholpen worden door het toerental nog verder te laten stijgen bij de grotere stromen. Het verband tussen stroomprofiel en toerental dient opnieuw te worden bepaald.

De vermogenprofielen die men bij i-NET ter beschikking heeft, hebben meetwaarden met een interval van 3 seconden. Met een reactietijd van de proefopstelling van 1 seconde, zijn deze profielen beperkt versneld te sturen.

Er zal met dit model een groot verschil blijven tussen gestuurd actief vermogen, dat ingesteld wordt in het model en het actief vermogen dat vanuit inverter 1 naar de motor gestuurd wordt. Met als oorzaak dat een AC-motor reactieve energie nodig heeft om zijn veld op te bouwen en de sturing niet optimaal verloopt. Om toch de grootte van het actief vermogen te bepalen kan via een aparte datalogger en Excel een wiskundig verband opgesteld worden tussen de vermogens.

Tot slot kunnen we stellen dat de onderzoeksopzet is geslaagd. Het eerste luik, de literatuurstudie geeft een goed beeld over de verschillende DSM systemen en technologieën die momenteel gebruikt worden en zo meer hernieuwbare energie te integreren in het net.

Het tweede luik van het onderzoeksopzet, het bouwen van een proefopstelling, heeft niet alle vooropgestelde doelstellingen bereikt. Er is een werkende proefopstelling die het mogelijk maakt een vermogenprofiel af te spelen en zo energie te sturen tussen 2 netten. Het afspelen kan versneld maar door de traagheid van het systeem met de motor generator koppeling is de versnelling eerder beperkt. Ook het verschillend belasten van de fases bleek niet eenvoudig met de modellen die voorhanden waren.

In de toekomst kan er bij iNET verder getest worden met DSM en mits enkele ingrepen verdere stappen worden gezet in het onderzoek naar de invloed van DSM systemen op het net.

Bibliografie

- [1] ELIA Users Group System Operation verslag vergadering 16/02/2012
- [2] ELIA *Balancingmechanisme* <http://www.elia.be/en/products-and-services/balance/balancing-mechanism>
- [3] ENTSOE European Network of Transmission System Operators for Electricity
Operational reserve ad hoc team https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/resources/LCFR/2012-06-14_SOC-AhT-OR_Report_final_V9-3.pdf
- [4] Evolution of ancillary services needs to balance the Belgian control area towards 2018
ELIA <http://www.elia.be/nl/grid-data/balancing/~media/files/Elia/Grid-data/Balancing/Reserves-Study-2018.pdf>
- [5] Mirabel project FP7 *Micro-Request-Based Aggregation, Forecasting and Scheduling of Energy Demand, Supply and Distribution*. <http://www.mirabel-project.eu/>
- [6] VDE Studie Demand Side Integration *Ein notwendiger Baustein der Energiewende: Demand Side Integration ?Lastverschiebungspotenziale in Deutschland*
http://www.vde.com/de/Verband/Pressecenter/Pressemappen/documents/2012-06-11/vde_dsi_pk_berlin_2012-06-11_v3.pdf
- [7] Europe 2020 targets *testit* http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/targets/index_en.htm
- [8] ,John, *Open ADR Alliance* http://www.openadr.org/index.php?option=com_content&view=article&id=92:iec-approves-openadr-specification&catid=21:press-releases&Itemid=121
- [9] Ir D. Lemmens, *Outil de mesure des signaux PLC (Power Line Communication) pour les réseaux de distribution* , Chaire ORES Smart Grids - Smart Metering conference - LABORELEC http://hosting.umons.ac.be/aspnet/journeeoress/2013/2013_04_18_cORES_Lemmens.pdf
- [10] D. Westermann, A. John, *Demand matching wind power generation with wide-area measurement and demand-side management*, IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 22, no. 1, pp. 145?149, 2007.

- [11] Nepca *Utility demand-side management experience and potential: a critical review* Annual Review of Energy and the Environment Nadel(2000), Nadel and Geller(1996), Eto(1996)
- [12] P. Palenski, D. Dietrich, Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*, VOL. 7, NO. 3, AUGUST 2011
- [13] J. Han M. Piette, Solutions for summer electric power shortages:Demand response and its applications in air conditioning and refrigerating systems, *Refrigeration, Air Conditioning, and Electric Power Machinery*, vol. 29, no. 1, pp. 1?4, Jan. 2008.
- [14] Solutions for summer electric power shortages:Demand response and its applications in air conditioning and refrigerating systems J. Han and M. Piette 2008
- [15] An efficient load model for analyzing demand side management impacts S. Rahman and . Rinaldy 1993
- [16] Integral resource optimization networks and their techno-economic constraints Int. J. Distrib. Energy Syst., vol. 1, no. 4, pp. 299?320, Oct. 2005.
- [17] L. Cantin, M. Deschenes, B. Comeau, and M. D. Amours, ?Controller for controlling operation of at least one electrical load operating on an ac supply, and a method thereof,? U.S. Patent 5 442 335, 1995.
- [18] SPEICHERSTUDIE 2013 Kurzugutachten <http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/speicherstudie-2013.pdf>
- [19] Kickstarter plugaway <https://www.kickstarter.com/projects/plugaway/plugaway-your-smart-home-on-your-smart-phone>
- [20] G. Terde, *Electrical Drives And Control Techniques*, Acco, 2004, pp. 123-270
- [21] M. Tech Student, Associate Prof., "Implementation of Unified Power Quality Conditioner in 3- φ 4-wire distribution system by using instantaneous power theory", *The International Journal Of Engineering And Science*, Vol. 2, pp. 42-49, 2013 <http://www.theijes.com/papers/v2-i8/Part.3/H0283042049.pdf>
- [22] A. Iqbal, "MATLAB/SIMULINK MODEL OF SPACE VECTOR PWM FOR THREE-PHASE VOLTAGE SOURCE INVERTER", *Universities Power Engineering Conference, 2006. UPEC '06. Proceedings of the 41st International*, Vol. 3, 10311631, 1096-1100, 2006
- [23] Kuperman A., Rabinovici R., "Shunt Voltage Regulators for Autonomous Induction Generators,Part II: Circuits and Systems", *Department of Electrical and Computer Engineering*, pp.124-129, 2005 http://www.academia.edu/4866298/Shunt_Voltage_

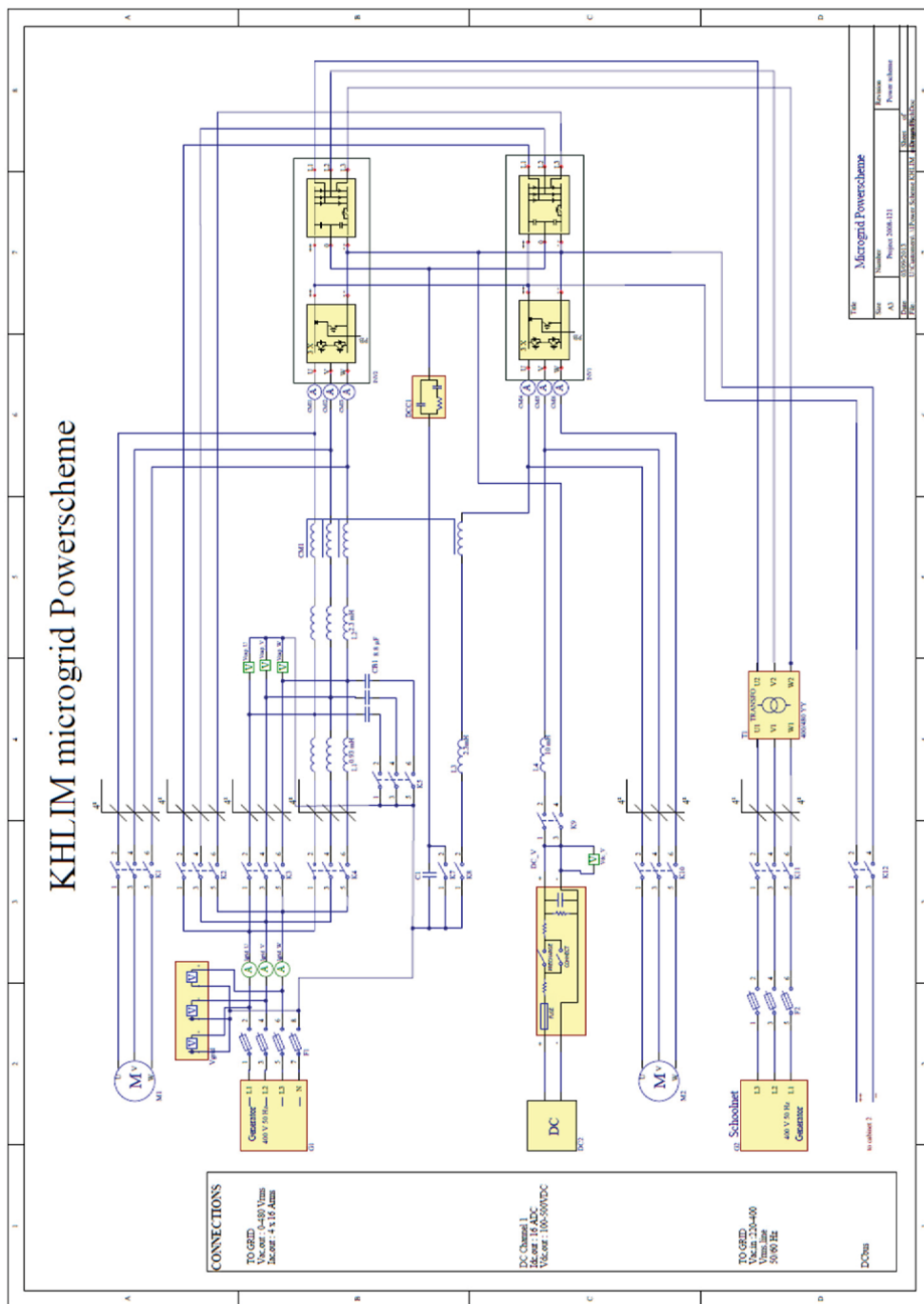
Regulators_for_Autonomous_Induction_Generators_Part_II_Circuits_and_Systems

- [24] Triphase. (2013). *Triphase*. Geraadpleegd [11/08/2014], <http://www.triphase.be/products/>
- [25] Sun D. . (28 september 2009). *College of Electrical Engineering, Zhejiang University*. Geraadpleegd [11/08/2014], <http://read.pudn.com/downloads169/sourcecode/embed/779893/Part204%20Clark&Park.pdf>
- [26] Microsemie.(2013).*Microsemie*.Geraadpleegd [11/08/2014], http://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/132799-park-inverse-park-and-clarke-inverse-clarke-transformations-mss-software-implementation-user-guide
- [27] Vandensande, G. (2012). *Electrical Machines: Compiled by Geert Vandensande FEL-IND/FELPDE*. Harlow:Pearson Education Limited
- [28] Ranta M. (2013). *Dynamic induction machine models including magnetic saturation and iron losses*. Aalto university: School of Electrical Engineering - Department of Electrical Engineering, <http://lib.tkk.fi/Diss/2013/isbn9789526053967/isbn9789526053967.pdf>

Appendices

Bijlage A

Elektrisch schema



Bijlage B

Het model

Het gebruikte model heet '*PM15F30M30C*'. De naamgeving voor de Triphasemodellen gebeurt als volgt:

* Het eerste deel:

- PM = Power Module;
- een cijfer, dat het vermogen geeft van de omvormer, in dit geval 15;

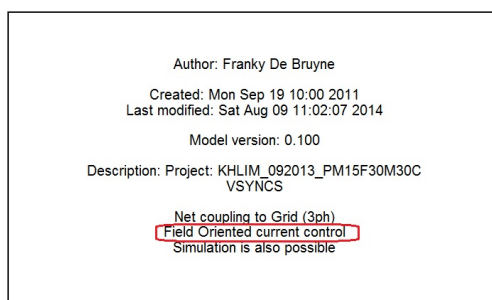
* Het 2^{de} deel:

- een letter, F = netkoppling
- een cijfer, in dit geval 30, waarbij het eerste cijfer 3 x AC aangeeft en het 2de cijfer 0 x DC

* 3^{de} deel

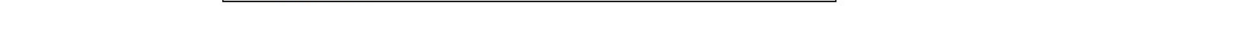
- een letter, M toont motorsturing
- een cijfer, in dit geval ook 30, waarbij opnieuw 3 x AC, en 0 x DC

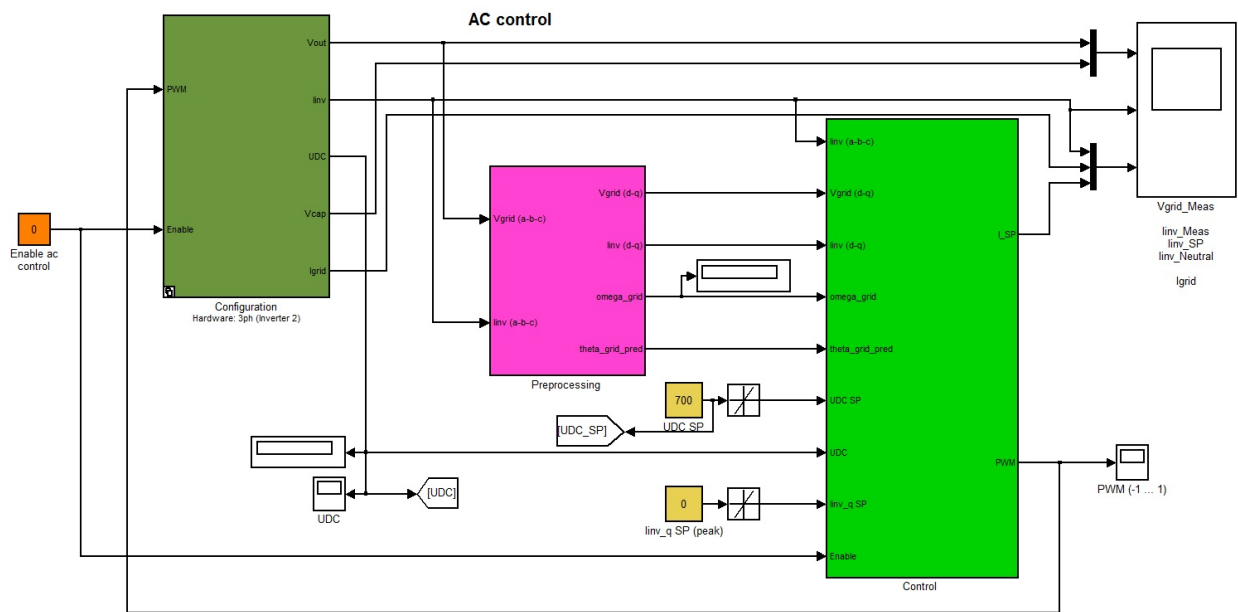
Figuur B.1 toont de model versie. De term Field Oriented current control slaat hier terug op de motorsturing. Er wordt enkel mee bedoeld dat men een stroomveld laat ronddraaien en de motor dit zal volgen. Dit heeft niks te maken met Field Oriented Control of FOC.



Figuur B.1: Model versie

Figuur B.2 toont het hoofdschema van het model dat gebruikt is in de proefopstelling.





Figuur B.3: AC control

B.1.1 Preprocessing

Figuur B.4 toont de Preprocessing blok met in- en uitgangsscopebeelden. De functies van deze blok zijn:

- berekenen van de spanning en stroom in d-q assenstelsel;
- bepalen van theta (hoek die d-q asstelsel met alfa-beta maakt zodat Vgrid samenvalt met d-as);
- bepalen van omega of de snelheid waarmee spanningsvectoren Vgrid(abc) roteren ($2\pi \cdot 50$)



Figuur B.5 toont het overzicht van de Control blok. De constante parameter MV_{FF} is echt een offsetwaarde die meegegeven kan worden aan een PI controller. Maar voor de DC-bus regeling mag deze gerust op 0 blijven staan. Er valt in deze extra Feed Forward extra kennis mee te geven.

The diagram illustrates a three-phase inverter control system. It features several key components and signal flows:

- DCbus Voltage PI (orange block):** Receives **UDC SP** (input 6) and **UDC** (input 7). It outputs **MV** (output 1) to the **PI (linv current)** block and **linv_SP (d-q)** to the **Feedforward I** block.
- DC-link Voltage PI (grey block):** Receives **UDC** (input 7) and **UDC SP** (input 6). It outputs **linv_q SP** (output 8) to the **PI (linv current)** block.
- Feedforward I (green block):** Receives **linv_SP (d-q)** (input 1) and **linv_q SP** (input 8). It outputs **Vgrid (d-q)** (output 2) and **omega_grid** (output 4) to the **PI (linv current)** block.
- PI (linv current) (dark green block):** Receives **MV** (input 1), **linv_SP (d-q)** (input 3), **linv_q SP** (input 8), **Vgrid (d-q)** (input 2), and **omega_grid** (input 4). It outputs **Tracking** (output 1) and **Track_val** (output 1) to the **gamma** block.
- gamma (pink block):** Receives **Tracking** (input 1) and **Track_val** (input 1). It outputs **theta_grid_pred** (output 5) to the **Space Vector Modulation** block.
- Space Vector Modulation (min-max) (red block):** Receives **theta_grid_pred** (input 5) and **linv (a-b-c)** (input 1). It outputs **V (a-b-c)** (output 1) and **Vinv (a-b-c)** (output 2) to the **PWM** block.

B4 Faculteit industriële ingenieurswetenschappen

afkorting	komt van	uitleg	eenheid
linv (a-b-c)	linv	Stroom van inverter 2	A
Vgrid (d-q)	Vgrid (d-q)	Spanning van het net omgevormd naar d-q	V
linv (d-q)	linv (d-q)	Stroom van inverter 2 omgevormd naar d-q	A
Omega_grid	Omega_grid	Hoeksnelheid spanning van het net bij d-q	rad/s
Theta_grid_pred	Theta_grid_pred	Voorspelling van de hoek waarbij rekening wordt gehouden met de tijd tussen het meten en doorgeven van de hoek	rad
UDC SP	UDC SP	Instelbare setpoint van de DC-bus (constante)	V
UDC	UDC	Effectieve waarde DC-bus	V
Linv_q SP	Linv_q SP	Instelbare setpoint reactieve stroomcomponent	A
Enable	Enable ac control	Aanzetten van het model	-

Tabel B.1: Control ingangstabel

afkorting	gaat naar	uitleg	eenheid
I_SP	scope	Visualisatie	A
PWM	PWM	Aansturen van de configuration hardware	V

Tabel B.2: Control uitgangstabel

Space Vector Modulation

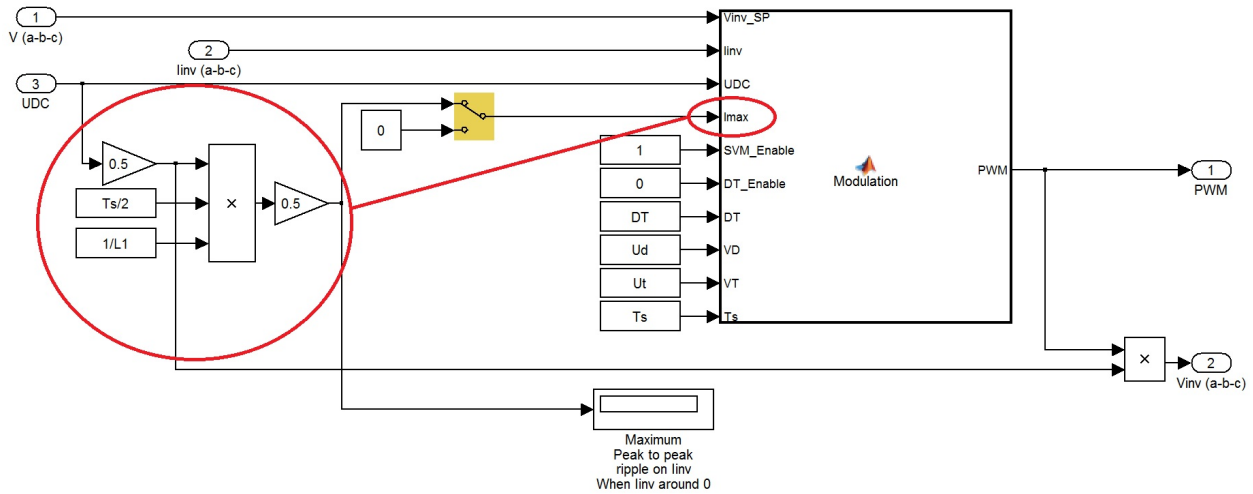
Figuur B.6 toont de Space Vector Modulation blok met berekening van de stroomrimpel. Al wordt het stroomrimpelgedeelte mogelijk niet in rekening gebracht, aldus Triphase. $V(a-b-c)$ komt onrechtstreeks van de spanning na de LCL filter. De stroom wordt gemeten achter de inverter. In de AC regeling wordt $V(a-b-c)$ gemeten om V_d en V_q te bepalen. In preprocessing wordt V_q op nul geregeld zodat V_d maximaal is. Hierdoor wordt de referentie van het net bepaald.

Verder worden $I_{out}(abc)$ en $I_{inv}(abc)$ omgezet naar $I_{out}(I_q)$ en $I_{inv}(d-q)$ zodat de setpunten hierop geregeld kunnen worden. Het is gemakkelijker een constante te regelen dan een waarde die schommelt. Deze waardes komen dan binnen op ingang (1) en (2).

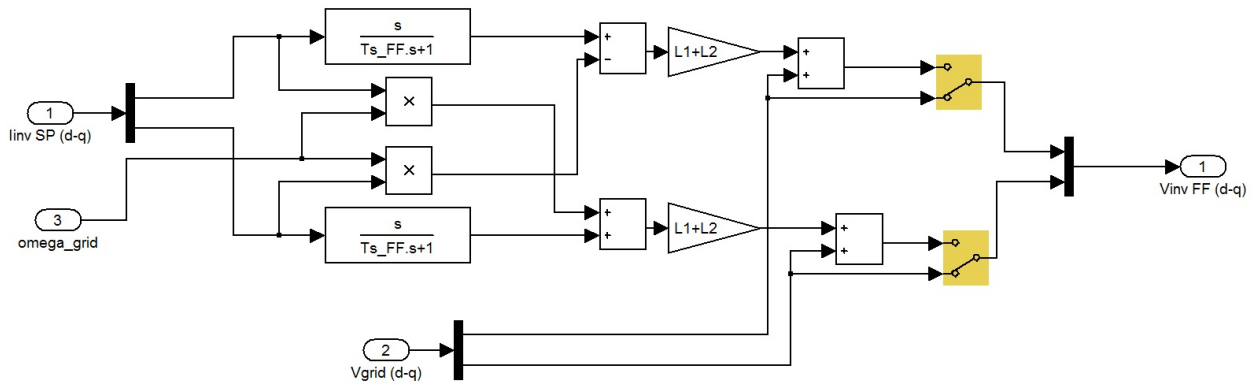
Stroomrimpel

FeedForward1

Figuur B.7 toont een restant van een experiment bij Triphase dat ze intern geprobeerd hebben om betere resultaten te krijgen. Zoals zichtbaar in de figuur wordt er geen rekening mee gehouden. De I_{inv} wordt beter geïnterpoleerd om zo een iets betere voorspelling te doen van de spanningsval die deze zou veroorzaken.



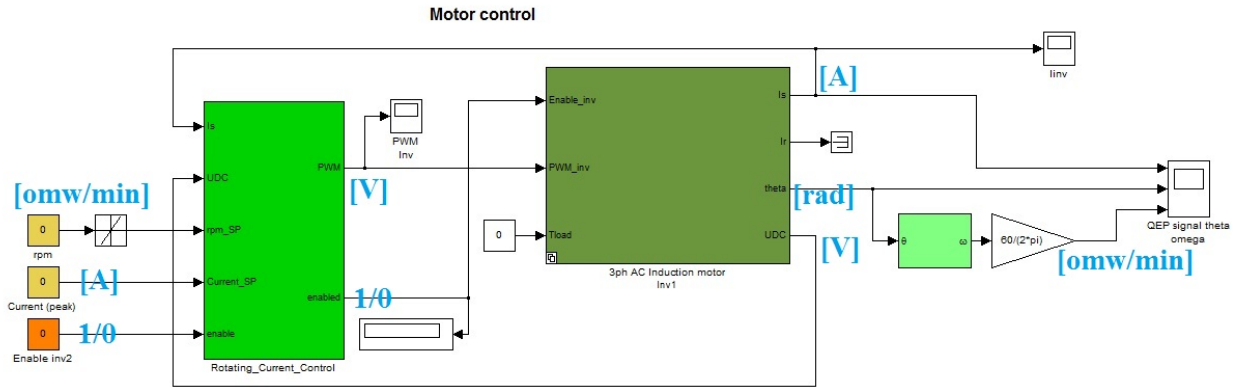
Figuur B.6: SVM met berekening stroomrimpel



Figuur B.7: Feedforward

B.2 Motor control

Figuur B.8 toont het onderdeel Motor Control. De samenhangende hardware van dit onderdeel is inverter1 uit het schema (bijlage A) en bevat dus geen LCL-filter. Het toerental, de gewenste (totale!) stroom zijn de instelbare parameters.



Figuur B.8: Motor Control

B.2.1 Rotating current control

Het binnenkomend toerental wordt omgezet naar hoeksnelheid:

$$\omega = rpmSP * \frac{2 * \Pi}{60} \quad (B.1)$$

Daarna wordt de hoeksnelheid vermenigvuldigd met p ($=1$ in de parameters) en ' Ts ' (sampletijd). Door ω (rad/sec) te vermenigvuldigen met ' Ts ' (sec) bekomt men een hoek in radialen. Het blokje ' $(1/z)$ ' zorgt voor een discrete integratie.

De functie *wrap* zorgt voor afronding op de huidige hoek met gehele keren 2π . Men bekomt een hoek tussen 0 en 2π .

Floor is een afrondingsfunctie. In formule:

$$u - 2 * \pi * floor\left(\frac{u}{2 * \pi}\right) \quad (B.2)$$

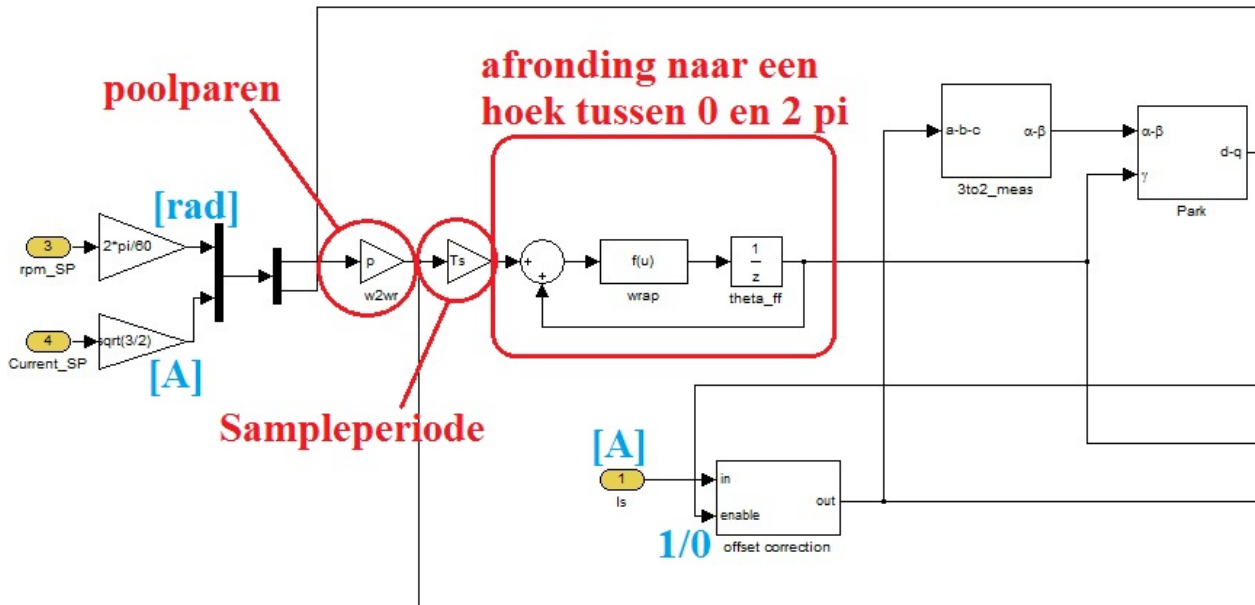
Waarbij ' u ' de binnenkomende waarde is.

De hoeken γ worden zo bij elkaar opgeteld tot men een volledige cirkel gedraaid heeft, om weer bij 0 uit te komen.

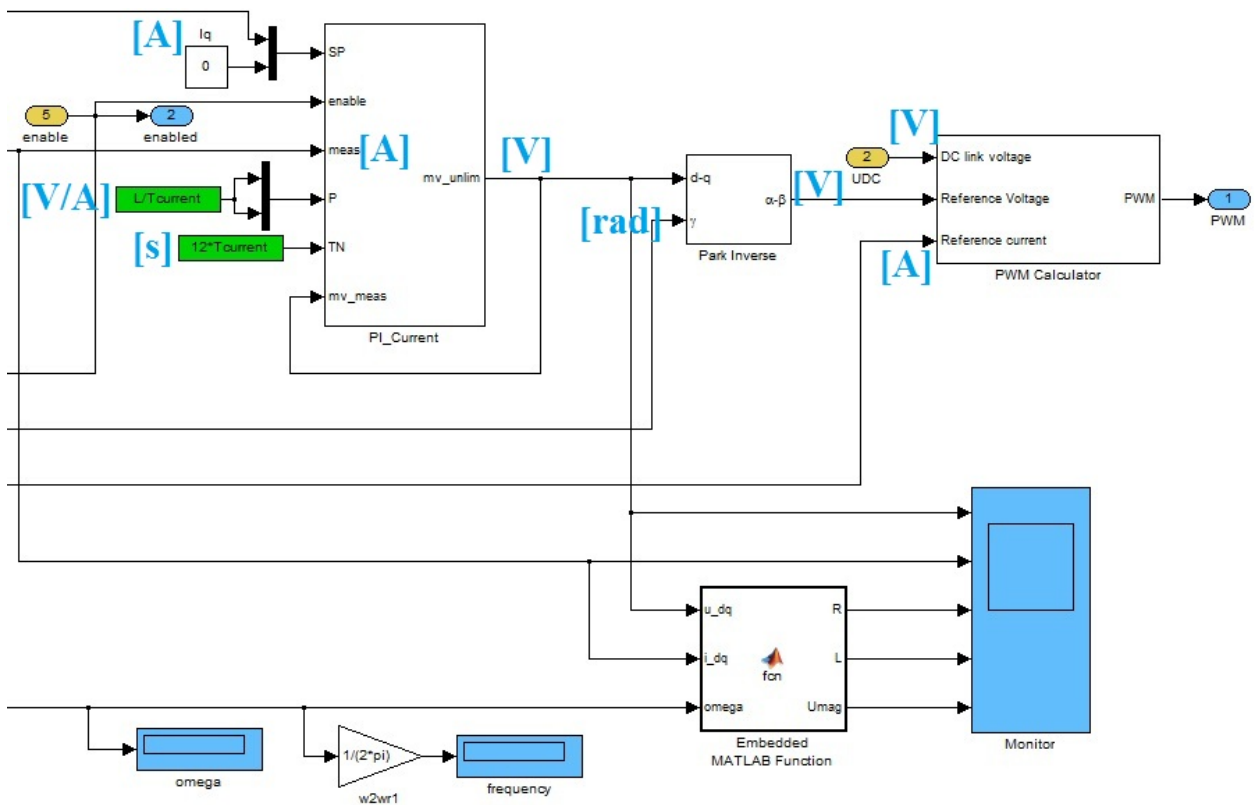
Deze hoek γ wordt gebruikt in de Park- en inverse Park-transformatie om te bepalen aan welke snelheid we het alfa-beta assenstelsel moeten laten ronddraaien om een stilstaand d-q assenstelsel te bekomen.

$Current_{SP}$ afkomstig van de ingegeven constante $Current (peak)$, hier op ingang 4, is een actieve stroom waarde. De RMS stroomwaarde ligt $\sqrt{\frac{3}{2}}$ hoger (zie Park-transformatie). Deze waarde wordt doorgekoppeld naar de PI regelaar.

Het stukje met $theta_{ff}$ dient als driftcompensatie om de hoek niet oneindig te laten oplopen.



Figuur B.9: Rotating current control deel1



Figuur B.10: Rotating current control deel2

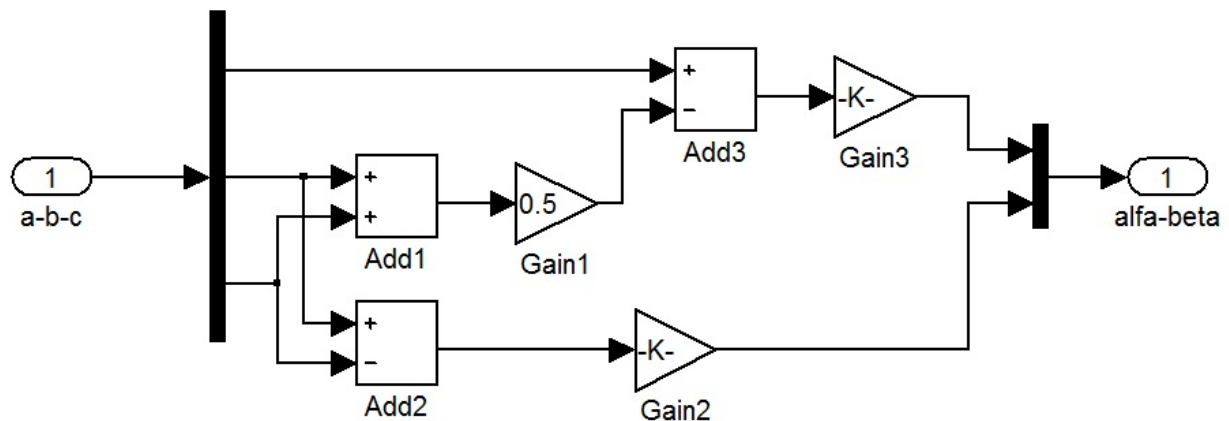
$3to2_meas$

De 3 binnenkomende spanningen worden opgedeeld volgens onderstaande vergelijkingen:

$$\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} * [UL1 - \frac{(UL2 + UL3)}{2}] \quad (B.3)$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} * (UL2 - UL3) \quad (B.4)$$

Drie windingen worden voorgesteld door twee windingen die dezelfde flux realiseren. De stroom door de winding wordt voorgesteld door een vector.



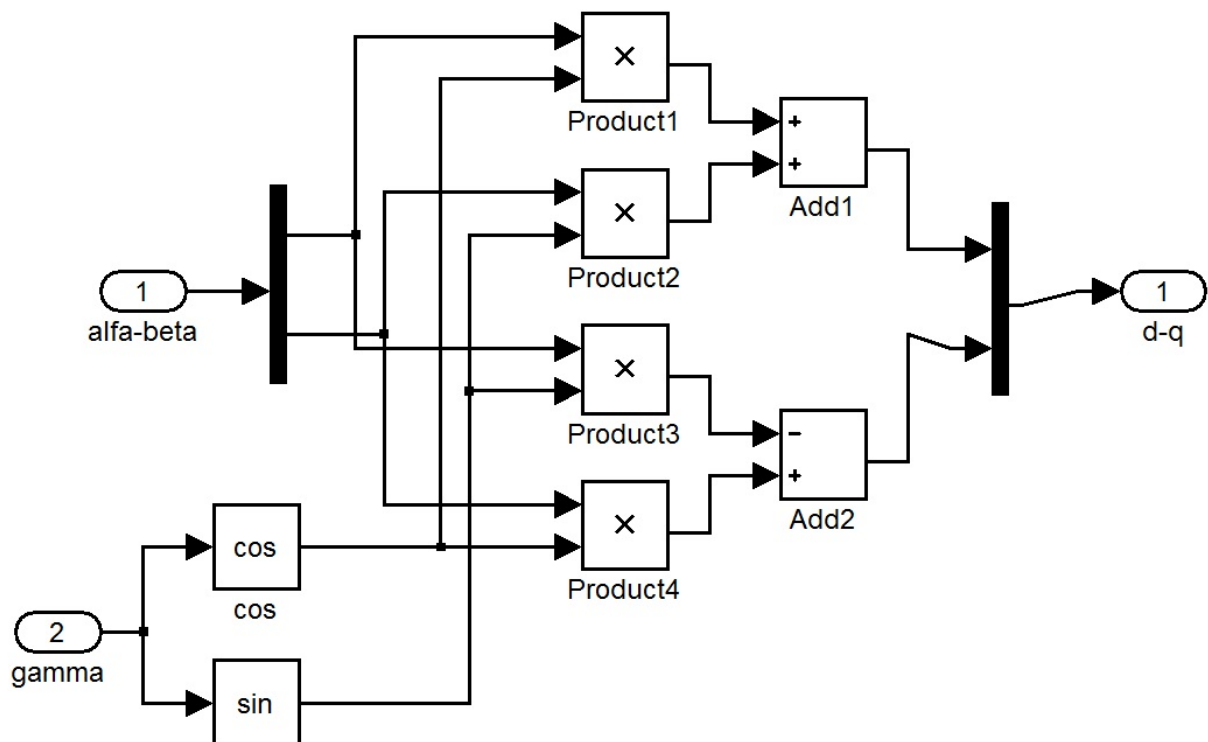
Figuur B.11: Clarke-transformatie

Park-transformatie

Figuur B.12 toont de Park-transformatie. In formules:

$$I_d = I_\alpha * \cos(\gamma) + I_\beta * \sin(\gamma) \quad (\text{B.5})$$

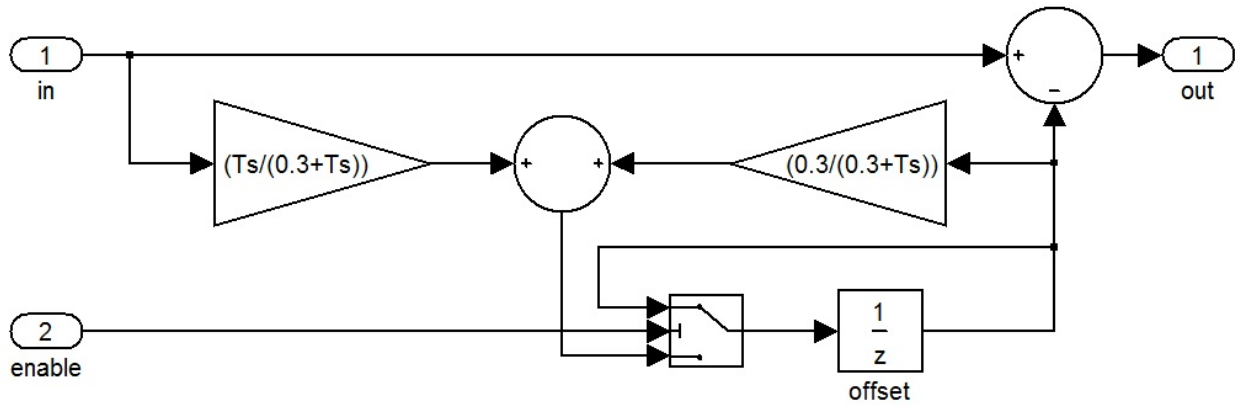
$$I_q = I_\beta * \cos(\gamma) - I_\alpha * \sin(\gamma) \quad (\text{B.6})$$



Figuur B.12: Park-transformatie

Offset correction

Figuur B.13 toont de offset correctie. Deze regeling zal de offset compenseren op de metingen. Als de enable op 0 staat, zou er geen stroom mogen vloeien en begint de integrator de fout te integreren. De 0.3 is een tijdsconstante (τ) van de lowpass-filter. Dit is gewoon een gekozen waarde.



Figuur B.13: Offset correctie

PI Current

Figuur B.14 toont een andere manier om offset te compenseren. Dit is een probeersel uit het verleden van de demoware. Het kan zijn dat de uitwerking anders geïmplementeerd is. Wat hier vreemd is aan deze implementatie is dat de meting geïntegreerd wordt en niet de fout, aldus Triphase.

De uitgang mv_i maakt voor 120/121 deel gebruik van de vorige berekende waarde en voor een 1/121 deel van de gemeten waarde. Dit zou kunnen dienen als driftcompensatie: Wanneer de kleinst mogelijke digitale uitgang 1 bitje uitstuurt wordt dit via de gesloten lus kunnen versterkt. Softwarematig is dit geen probleem, hardwarematig kan de $mv_{unlimited}$ oneindig oplopen. Door de gemeten waarde te gebruiken in de lus creëert men altijd een kleine fout die verbeterd moet worden om te voorkomen dat de uitgang naar oneindig evolueert. Tot slot wordt de enable doorgeschakeld om de uitgang op '0' te zetten. Volgende parameters worden gebruikt:

- $T_{current} = 6,25 * 10^{-4} s$
- $L = 0,05 H$

In formules:

$$T_{current} = 10 * Ts \quad (B.7)$$

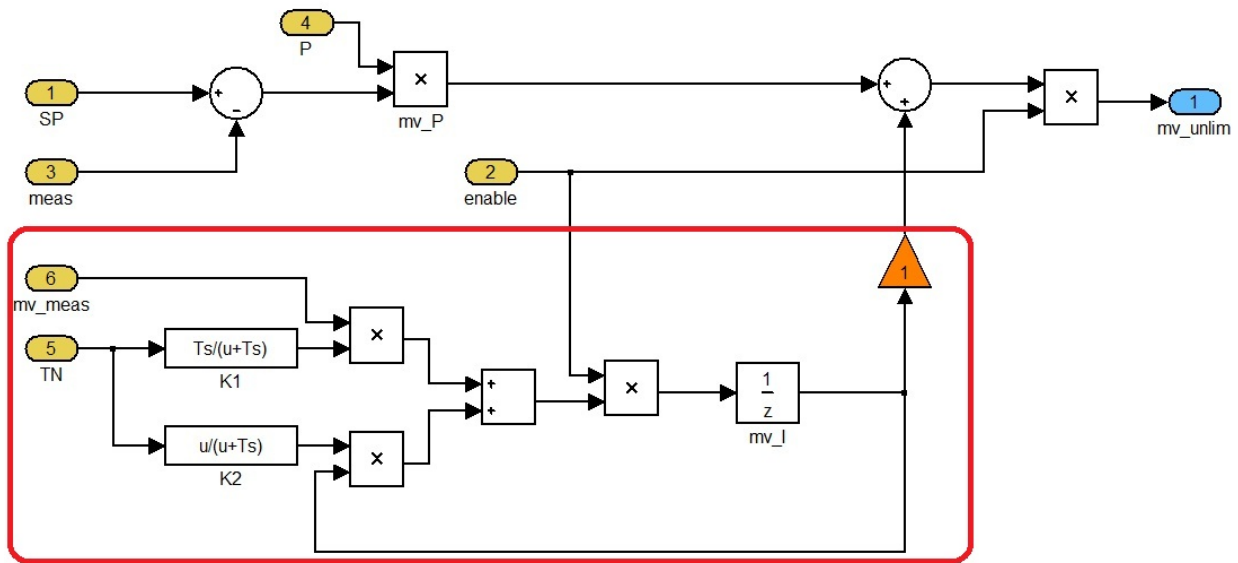
$$TN = 12 * T_{current} \quad (B.8)$$

$$TN = 120 * Ts \quad (B.9)$$

$$mv_i = 1 * \left(\frac{Ts}{TN + Ts} * mv_{meas} + \frac{TN}{TN + Ts} * mv_i \right) \quad (B.10)$$

$$mv_i = \frac{Ts}{120 * Ts + Ts} * mv_{meas} + \frac{120 * Ts}{120 * Ts + Ts} * mv_i * \frac{1}{Z} \quad (B.11)$$

De TN-factor stemt eigenlijk overeen met de τ van een eerste orde lowpass-filter. Wanneer TN vervangen wordt door 0.1, zal de uitgang sneller convergeren naar het ingangssignaal.



Figuur B.14: PI Current

afkorting	komt van	uitleg	eenheid
SP	Current_SP	Actieve component van de stroom (Id)	A
enable	Enable inv2	Hoofdblok enable	-
meas	d-q	Terugkoppeling van de inverterstroom na omvorming	A
P	C^{te}	$L/T_{current}$	V/A
TN	C^{te}	$12 * T_{current}$	s
mv_meas	mv_unlim	Terugkoppeling van de uitgang	V

Tabel B.3: Ingangstabel PI Current

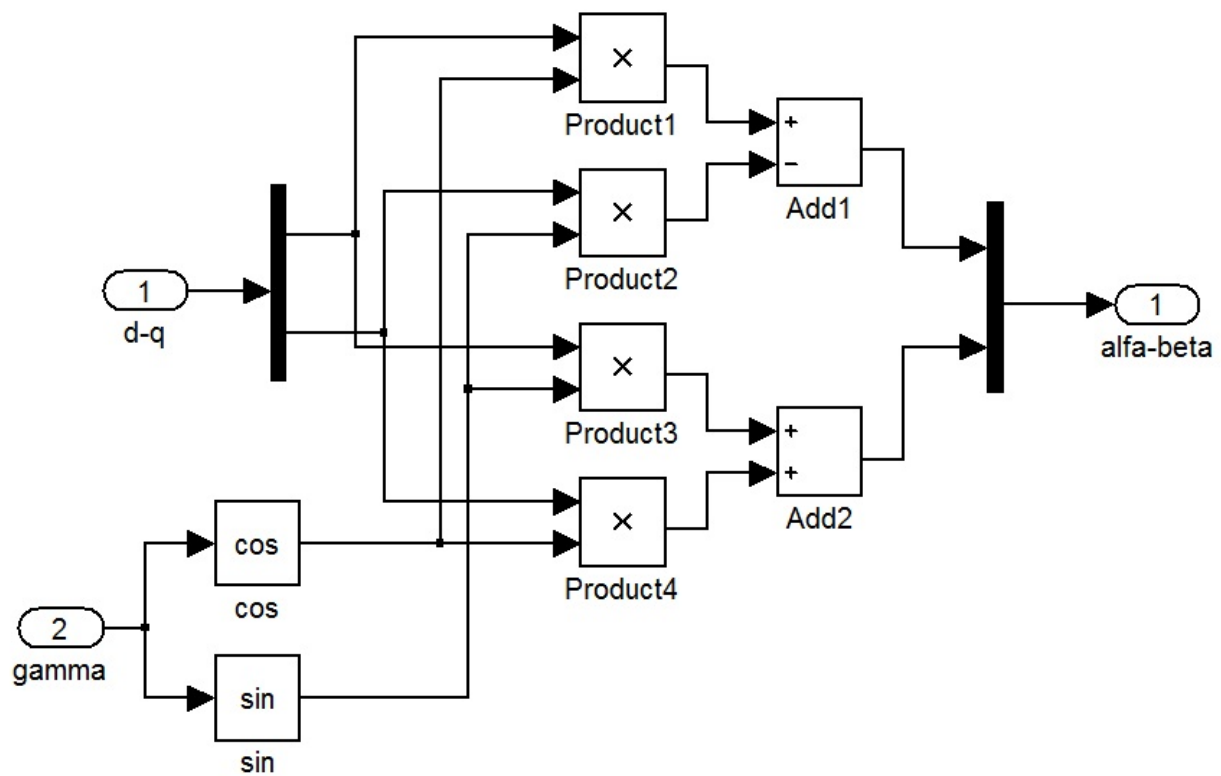
Park Inverse

Figuur B.15 toont de inverse Park-transformatie.

In formules:

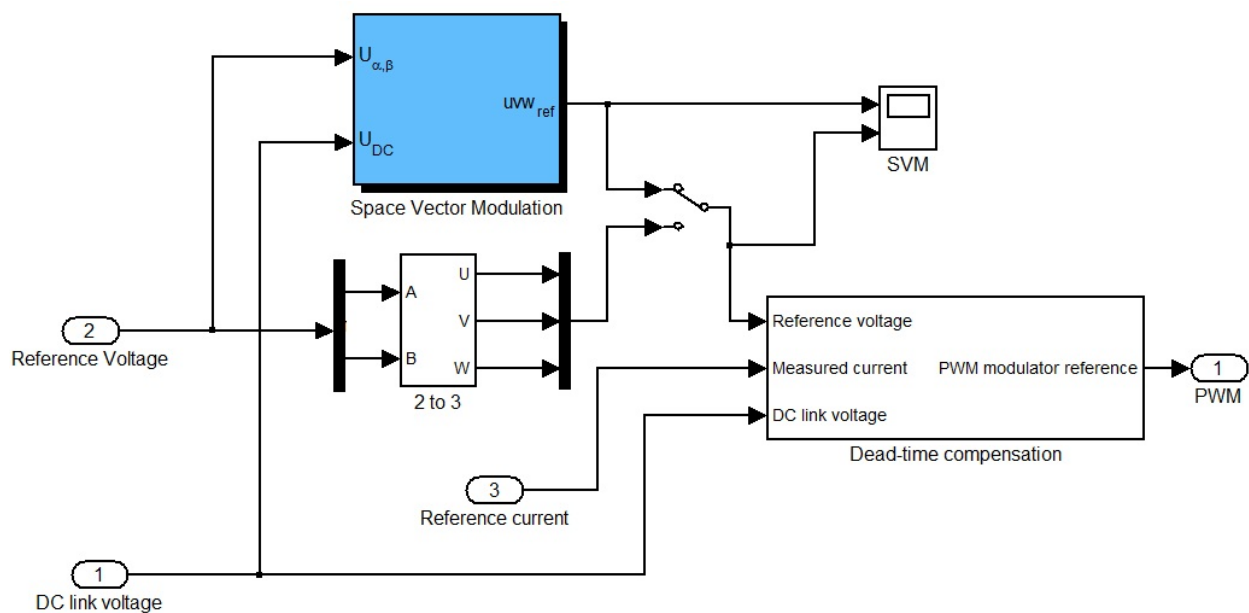
$$I_{\alpha} = \cos(\gamma) * I_d - \sin(\gamma) * I_q \quad (B.12)$$

$$I_{\beta} = \sin(\gamma) * I_d + \cos(\gamma) * I_q \quad (B.13)$$



Figuur B.15: Inverse Park-transformatie

PWM calculator

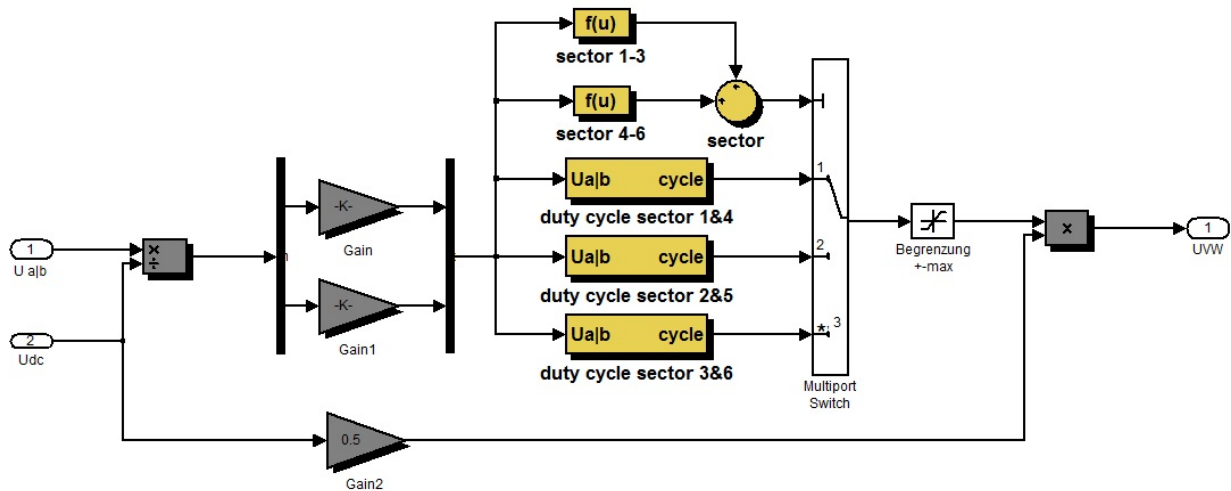


Figuur B.16: PWM Calculator

Space Vector Modulation

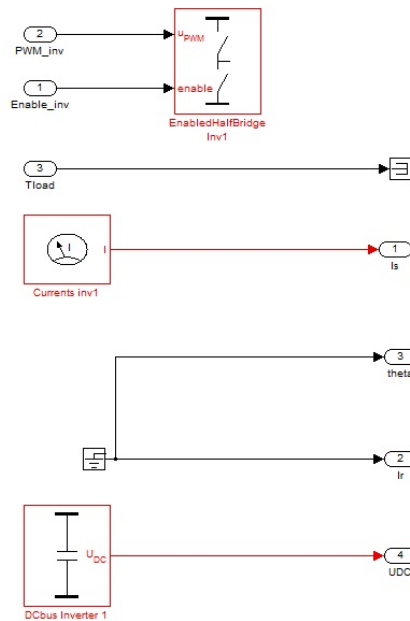
Figuur B.17 toont het actief en reactief setpunt dat omgezet wordt naar abc-vectoren. Afhan-

kelijk van de sector waarin ze zitten, hebben ze een andere amplitude. Omdat de amplitude bv. negatief wordt.



Figuur B.17: Space Vector Modulation

B.2.2 3ph AC Induction motor Inv 1 - Hardware



Figuur B.18: Driefase hardwareconnectieblok inverter1

afkorting	komt van	uitleg	eenheid
Enable_inv	Enable inv2	Algemene enable Motor control	-
PWM_inv	PWM	Onrechtstreeks bepaald door ingestelde stroom of toerental	V

Figuur B.19: Ingangstabel hardware inverter1

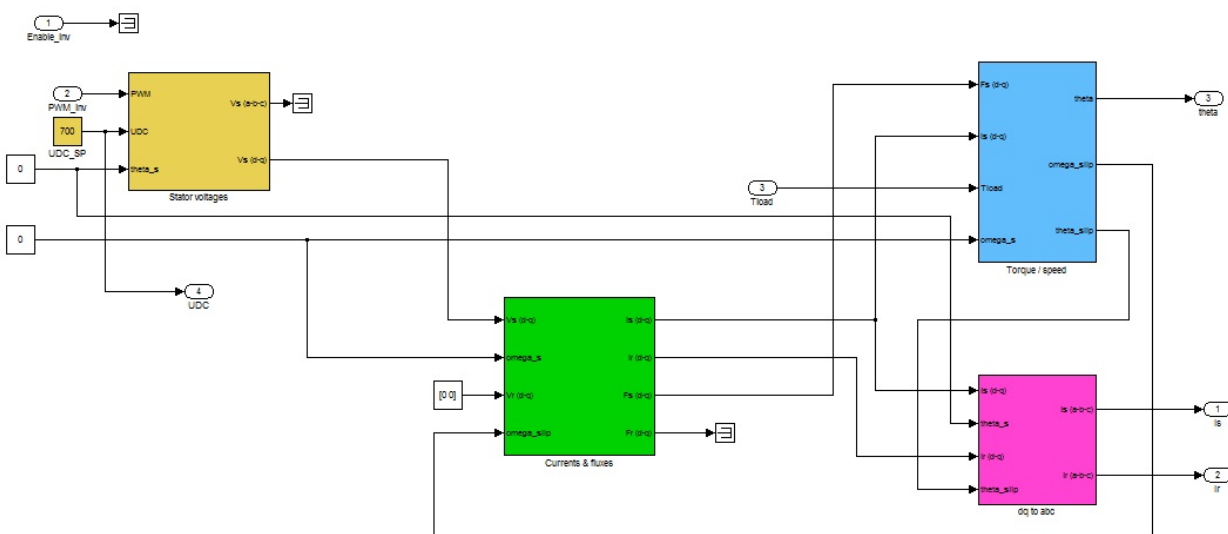
afkorting	Gaat naar	uitleg	eenheid
Is	in	Gaat naar offset correction	A
Ir	-	Wordt niet gebruikt in dit model	A
Theta	theta	Gebruikt voor omzetting naar toerental op scope	°
UDC	DC link voltage	De tussenspanning wordt gebruikt om de uitgangsamplitude van het PWM-sigitaal te creëren	V

Figuur B.20: Uitgangstabel hardware inverter1

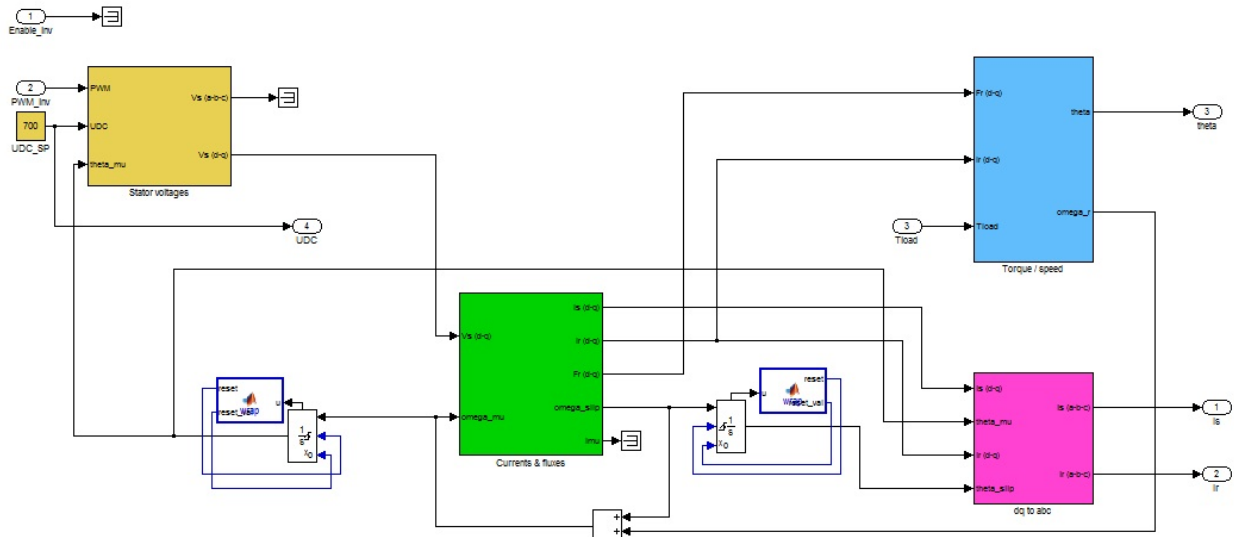
B.2.3 Simulationsmodus

Het Simulink demomodel van Triphase bevat de mogelijkheid om twee verschillende simulaties uit te voeren. Men kan de uitvoermodus van het schema wijzigen door via de 'driefase hardwareconnectieblok' van Inverter1 rechts te klikken en in het menu te kiezen voor '*block-choice*'. Men krijgt dan de keuze tussen inv1, simulation1 of simulation2. Eenmaal deze instelling gebeurd is, kan men via '*look under mask*' de onderliggende functieblokken bekijken.

Deze simulatiemodi werden amper gebruikt tijdens het testen van de proefopstelling en worden daarom niet verder uitgewerkt.



Figuur B.21: Simulatiemodus 1



Figuur B.22: Simulatiemodus 2

B.3 Parameterlijst

```

1 clear all;
2 clc;
3
4 % Inverter_specifications %
5 % ----- %
6 DT = 2e-6; % Inverter deadtime
7 Ts = 1/16000; % Inverter switching frequency
8 LDT = 1e6; % Deadtime current scaling factor
9
10 Ud = 0.7; % Voltage drop over the inverter
    freewheeling diodes (used in deadtime compensation)
11 Ut = 0.9; % Voltage drop over the inverter IGBT (
    used in deadtime compensation)
12
13 C_cap = 2*500e-6; % DC-link capacitor value (500 F per
    inverter)
14 U_DC_init = 230*sqrt(6); % Initial DC-link voltage with 3phase
    connection
15 latency = 0; % Latency of the controlboard - TargetPC
    communication
16 T_D1 = 1; % Time delay between connecting the LCL-
    filter and bypassing the resistor
17 T_D2 = 2; % Time delay between disconnecting the
    LCL-filter and bypassing the resistor
18 fm=1;

```

```

19
20 % Magnetics
21 % -----
22 L1 = 2.3e-3; % Initial inductance value of L1
23 L2 = 0.93e-3; % Initial inductance of L2
24 r_L1 = 0.2; % Estimated parasitic resistance value of
    L1
25 r_L2 = 0.1; % Estimated parasitic resistance value of
    L2
26 r_C = 0; % Estimated parasitic resistance value of
    C
27 C = 8.8e-6; % Capacitance value of C
28
29 L_DC=10e-3; % Initial inductance value of L1_DC
30 C_DC=1e-3; % Capacitance value of C_DC
31
32 L_CM = 20e-3; % Initial inductance value of L_CM
33 C_CM = 0.68e-6; % Capacitance value of C_CM
34 R_damp = 66; % Resistance value of R_damp
35 C_damp = 2.2e-6; % Capacitance value of C_damp
36
37 % Extrapolation
38 % -----
39 Tpred = (latency+2) * Ts; % Prediction horizon (used to compensate
    the inherent delay between measuring and acting
40
41 % 90 phase shift
42 % -----
43 Tq = 1/(2*pi*50);
44
45 % Filter in feedforward
46 % -----
47 Ts_FF = 10 * Ts;
48
49 % Time constants of control loops
50 % -----
51 Tcl_I = 1e-3; % Closed loop time of the inner current
    control for AC loop
52 Tcl_U = 20e-3; % Closed loop time of the outer DCbus
    voltage control for AC loop
53 Tcl_Idc = 1e-3; % Closed loop time of the inner current
    control for DC loop

```

```
54
55 Tcl_Icell = 1e-3;
56 Tcl_Ucell = 50 * Tcl_Icell;
57
58 %PI resonant
59 %—————
60 f_grid = 50; % Grid frequency (used in the
    PI_resonant controller)
61 Ti_IAC_PM15 = 2*Tcl_I; % Integral action of the
    PI_resonant controller
62 Kc_IAC_PM15 = 2*L1/Tcl_I; % Proportional action of the
    PI_resonant controller
63 Tenable = 0.5;
64 Mul = 0;
65 dzeta = 0;
66 delay = 2*Ts;
67
68 % Simulation_DC
69 %—————
70 N_bat = 16;
71 I_Charge = 5;
72 I_Discharge = -10;
73 Vdc_sim=200;
74
75 %Motor control
76 %—————
77 line_per_rev = 1024;
78
79 % simulation_motor
80 Ls = 8e-3; %stator inductance (H)
81 Rs = 2.2; %Stator resistance (Ohm)
82 Rr = 0.05; %Rotor resistance (Ohm)
83 Lr = 8e-3; %Rotor inductance (H)
84 Lh = 7e-3; %Main inductance (H)
85 J = 0.01; %Total inertia (Nm/(rad/s ))
86 Fv = 0; %Viscous friction coefficient (Nm/(rad/s))
87 p = 1; %Number of pole pairs
88
89 % Controllers
90 Tcl_S = 0.5;
91 Tcl_Im = 1e-3;
92 slew_rate = 1000;
```

```
93 Vmax = 230;  
94 Imax = 10;  
95 L = 50e-3;  
96 Tcurrent = 10*Ts;  
97 disp('Loading of parameters OK')
```


Bijlage C

Installatie Triphase toolbox

Stap 1: Installeren van Matlab

Installeren van Matlab R2011b.

Deze installatie moet gebeuren via ICT. Johan Heylen heeft login voor het toekennen van Matlab-licentie. Deze matlab-licenties zijn in 2008 aangekocht door Annick Dexters. Later zijn deze aangepast naar Matlab R2011b. Van de 10 licenties is er nog maar één beschikbaar.

Stap 2: Installeren van C-compiler

Installeer een C-compiler.

Professionele versie van Visual Studio 2010 Professional is beschikbaar onder:

T:\nal_fil\MSI\VS2010 MSI XP

Gebruik administrator rights

Stap 3: Download laatste versie van Triphase software.

Copieer Triphase toolbox “triphase-full-installer_8%2e9.zip” beschikbaar op laptop 192.168.0.3

Uipakken van zip-file in folder “xxx”

Stap 4: Installeren van TriPhase software

Start Matlab.

Matlab dropdown menu:

Set Path ... Zodanig dat de directory “xxx” beshikbaar is binnen het path.

Matlab-commando:

```
>> Mex –setup
```

Dit commando verwijst naar de C-compiler.

Set current directory naar \...\xxx\

Copy dummy.c naar root-directory.

Matlab dropdown menu:

Open \...\xxx\installTriphaseSoftware.m

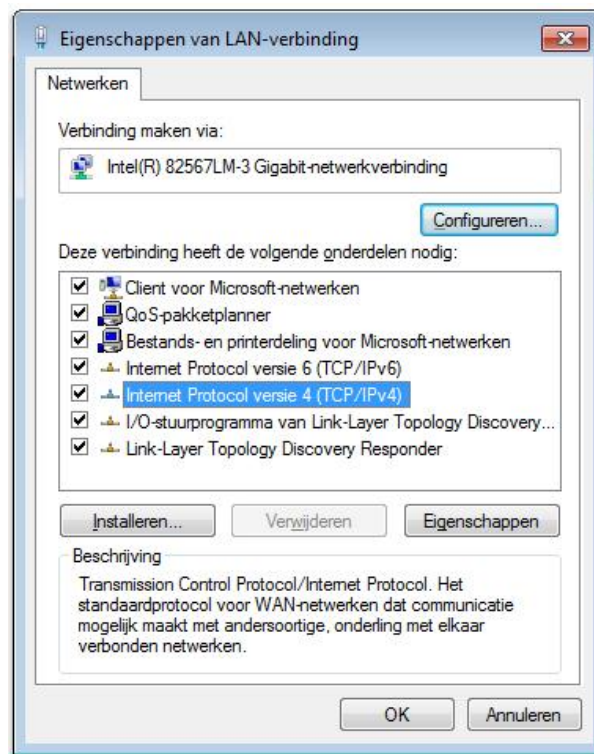
Run this file to install Toolbox voor matlab.

Not using internet.

Stap 7: Aanpassen van IP-address Laptop

Aanpassen van IP-address van laptop.

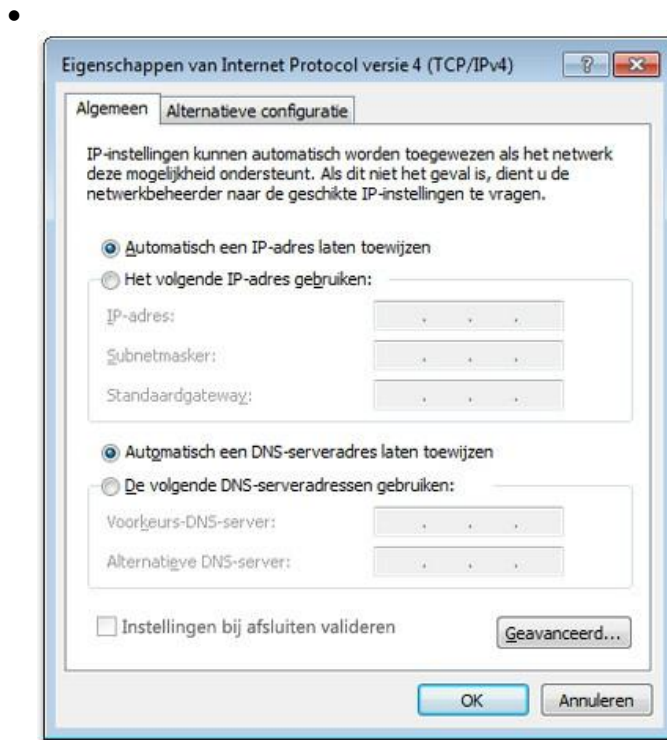
- Open Netwerkverbindingen door te klikken op de knop **Start**  en vervolgens op **Configuratiescherm**. Typ **adapter** in het zoekvak en klik vervolgens op **Netwerkverbindingen weergeven** onder Netwerkcentrum.
- Klik met de rechtermuisknop op de verbinding die u wilt wijzigen en klik vervolgens op **Eigenschappen**.  Als u om het beheerderswachtwoord of een bevestiging wordt gevraagd, typt u het wachtwoord of een bevestiging.
- Klik op de tab **Netwerk**. Klik onder **Deze verbinding heeft de volgende onderdelen nodig** op **Internet Protocol Version 4 (TCP/IPv4)** of op **Internet Protocol Version 6 (TCP/IPv6)** en klik vervolgens op **Eigenschappen**.



Dialogoogvenster

Eigenschappen van netwerkverbinding

- Als u instellingen voor een IPv4 IP-adres wilt opgeven, gaat u op een van de volgende manieren te werk:
 - Als u wilt dat de IP-instellingen automatisch worden toegewezen met DHCP, klikt u op **Automatisch een IP-adres laten toewijzen** en klikt u vervolgens op **OK**.
 - Als u handmatig een IP-adres wilt toewijzen, klikt u op **Het volgende IP-adres gebruiken** en typt u vervolgens in de vakken **IP-adres**, **Subnetmasker** en **Standaardgateway** de instellingen voor het IP-adres.



- Dialoogvenster Eigenschappen van Internet Protocol versie 4 (TCP/IPv4)

IP-adres: 192.168.0.3 (Dit address wordt gekozen uit een lijst van nog beschikbare IP-adressen voor het labo H006).

Subnetmasker: 255.255.255.0

Standardgateway: 192.168.0.254

Stap 8: Verbinding maken met TargetPc

Matlab commando.

Matlab commando bevat IP-address van de te adresseren Target-PC:

Target-PC "3p-khlim-1": 192.168.0.59

Target-PC "3p-khlim-2": 192.168.0.60

```
>> tg=xeno('192.168.0.59')
```

De naam tg kan later gebruikt worden voor het adresseren van de fieldbus.

Matlab commando:

```
>> configureTarget('192.168.0.59')
```

Met dit commando wordt de de TargetPC geconfigureerd voor de juiste versie van Matlab.

Dit enkel gebeuren als de versie van Matlab wijzigt.

Test communicatie met fieldbus

```
>> tg.vbus.lamp_green=1
```

Groene lamp gaat branden.

```
>> tg.vbus.lamp_green=0
```

Groene lamp gaat uit.

Status van fieldbus

```
>>tg.vbusstatus
```

Stap 10: Opstarten van simulink model

Activeren van variabelen: run variables.m

1. TriPhase drop-down menu

Change target

2. TriPhase button

Build

3. Sluit de juiste contactors:

```
>> tg=xeno('192.168.0.59')
```

```
>> tg.vbus.k10=1
```

4. TriPhase drop-down menu

Activate this model

5. TriPhase button

Connect to target

6. TriPhase button

Run

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

Demand-side management op woning- en wijkniveau

Richting: **master in de industriële wetenschappen: energie-automatisering**

Jaar: **2014**

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

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

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

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

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

Voor akkoord,

Diraä, Rachid

Swerts, Gaëtan

Datum: **1/09/2014**