

2020 • 2021
Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: energie

Masterthesis
Onderzoek naar Digital Twin en ontwerp van een smart-grid-opstelling met maximale test- en aanstuurmogelijkheden voor de T2-campus

PROMOTOR :
Prof. ir. Aniceta DEXTERS

PROMOTOR :
Dhr. Jorn VANHEES

COPROMOTOR :
ing. Peter EVENS

Sam America
Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: energie, afstudeerrichting elektrotechniek

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



2020 • 2021

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: energie

Masterthesis

Onderzoek naar Digital Twin en ontwerp van een smart-grid-opstelling met maximale test- en aanstuurmogelijkheden voor de T2-campus

PROMOTOR :

Prof. ir. Aniceta DEXTERS

PROMOTOR :

Dhr. Jorn VANHEES

COPROMOTOR :

ing. Peter EVENS

Sam America

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



Woord vooraf

Het schrijven van een masterproef is geen gemakkelijke opgave en de juiste mensen om je heen, die je helpen en steunen, zijn daarbij zeer belangrijk gebleken. Graag wil ik enkele mensen bedanken voor de ondersteuning en hulp bij dit proces. Eerst en vooral wil ik mijn promotor, prof. ir. Annick Dexters bedanken voor de fijne samenwerking en haar constructieve feedback. Tijdens deze periode heb ik veel van haar geleerd wat ik in mijn toekomstige loopbaan zeker ga meenemen. Verder wil ik Jorn Vanhees en ing. Peter Evens, evenals de T2-campus bedanken voor hun ondersteuning en medewerking aan deze masterproef. Tot slot bedank ik graag mijn mama, zus, vriendin en vrienden die altijd klaar stonden om te helpen doorheen het hele proces. Dankzij hun steun kan ik een eindwerk voorstellen waar ik zeer trots op ben.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren	7
Verklarende woordenlijst	9
Abstract	11
Abstract in English	13
1. Inleiding	15
1.1. Situering	15
1.2. Probleemstelling.....	16
1.3. Doelstellingen.....	16
1.4. Methode.....	17
1.5. Vooruitblik.....	17
2. Literatuurstudie	19
2.1. Smart grids	19
2.1.1. Definitie.....	19
2.1.2. Smart grid conceptueel en architectuur model.....	20
2.2. Smart grid technologie	24
2.2.1. Advanced Metering Infrastructure (AMI)	24
2.2.2. Demand Side Management (DSM)	24
2.2.3. Distributed Renewable Energy Sources (DRES)	24
2.2.4. Internet of Things (IoT)	24
2.2.5. SCADA.....	25
2.3. Smart-grid-structuur van het smart-grid-labo.....	26
2.4. Digital Twins.....	27
2.4.1. Definitie.....	27
2.4.2. Digital Twins voor smart-grid-systemen	28
2.4.3. Digital Twin in een labo-omgeving	30
2.5. Digital Twin voor het smart-grid-labo	31
2.6. Hardware-in-the-loop-simulatie	32
2.7. Conclusie analyse Digital Twin voor het smart-grid-labo	35
3. Materiaal en methode	37
3.1. Materiaal van het smart-grid-labo	37
3.1.1. De labo-infrastructuur	37

3.1.2.	Inventaris	40
3.2.	Ontwerp van de smart-grid-opstelling	43
3.2.1.	Ontwerpeisen	43
3.2.2.	Benodigde labo-infrastructuur	43
3.2.3.	SCADA van de smart-grid-opstelling	48
3.2.4.	Besluit ontwerpmethode	51
3.3.	Scenario's smart-grid-opstelling	52
3.3.1.	De balancing van het net	52
3.3.2.	Spanningsregelingen en beveiligingen in een smart grid	56
4.	Resultaten en discussie	57
4.1.	Smart-grid-opstelling gestuurd vanuit SCADA	57
4.2.	Balancing van het lokaal smart grid	68
4.2.1.	Onbalans in het balance point	68
4.2.2.	Impact van variabele windsnelheid en windstoten	70
4.2.3.	Demand Side Management	75
4.2.4.	Werking batterijopslagsysteem in combinatie met een PV-installatie	78
4.2.5.	Impact schaduwvorming op PV-productie	83
4.3.	Spanningsregelingen en beveiligingen in het lokaal smart grid	84
4.3.1.	Reactieve vermogensregelingen	84
4.3.2.	On Load Tap Changer van de HVAC-proeftafel	84
4.3.3.	STATCOM HVDC-proeftafel	87
4.3.4.	Beveiligingen	87
4.4.	Discussie	89
5.	Conclusie	91
	Referentielijst	93
	Bijlagen	97

Lijst van tabellen

Tabel 1: Frequentieafwijkingen en de daarmee gekoppelde acties.....	53
Tabel 2: Regelingen generatoren	70
Tabel 3: Regelingen windturbinepark.....	73
Tabel 4: Regelingen verbruikers proeftafel.....	76
Tabel 5: Regelingen zonnepark met batterijopslag.....	78
Tabel 6: Verbruikprofiel consument	80

Lijst van figuren

Figuur 1: Traditioneel net en het net van de toekomst	19
Figuur 2: Conceptueel model van een smart grid	20
Figuur 3: Smart-grid-vlak - domeinen en hiërarchisch zones	22
Figuur 4: Het SGAM.....	23
Figuur 5: SCADA-systeem netwerk.....	26
Figuur 6: Digital Twin concept.....	27
Figuur 7: Flowchart optimalisatie algoritme DT.....	27
Figuur 8: Representatie van een DT in een distributienet.....	28
Figuur 9: DDM concept DT voor het controle centrum van een EBS.....	29
Figuur 10: Werkingsprincipe van een DT-labo.....	30
Figuur 11: Voorbeeld HIL-simulatie systeem.....	33
Figuur 12: CHIL-simulatie om een controller te testen	33
Figuur 13: PHIL-simulatie met vermogensversterkers tussen de HUT en de RTS	34
Figuur 14: OPAL-RT RTS-testbank.....	34
Figuur 15: Voorbeelden LabSoft en zijn virtuele instrumenten.....	38
Figuur 16: Overzicht Power-LAB-software	39
Figuur 17: SCADA-netwerktopologie smart-grid-labo.....	39
Figuur 18: Inventaris screenshot van het algemeen overzicht.....	40
Figuur 19: Inventaris screenshot SGCC proeftafel.....	41
Figuur 20: Inventaris screenshot "Investigating busbar systems"-cursus met bijhorende proef en deelproeven	41
Figuur 21: Inventaris screenshot van de SCADA-HMI van een proef uit de "Investigating busbar systems"-cursus.....	41
Figuur 22: Inventaris screenshot virtuele instrumenten uit LabSoft	42
Figuur 23: Inventaris screenshot van een deel van de componentenlijst en de IP-adressen..	42
Figuur 24: Principeschema smart-grid-opstelling.....	43
Figuur 25: SGCC-proeftafel.....	44
Figuur 26: Windturbinepark en HVDC-proeftafels	45
Figuur 27: Verbruikers proeftafel	45
Figuur 28: Batterijopslag en zonnepark proeftafels	46
Figuur 29: Energiecentrale en waterkrachtcentrale proeftafels	46
Figuur 30: Transformatoren proeftafel	47
Figuur 31: HVAC proeftafel.....	47
Figuur 32: SCADA-Designer device manager	48
Figuur 33: SCADA-Designer-workspace.....	48
Figuur 34: Voorbeeld HMI.....	49
Figuur 35: SCADA-PLC variabelen declareren van een PQ-meter	49
Figuur 36: Voorbeeld SCADA-logger	50
Figuur 37: Schema RC server-client relaties van de smart-grid-opstelling.....	51
Figuur 38: Schematische weergave van de frequentiestabiliteit van het net	53
Figuur 39: Schematisch overzicht van de activering van de reserves.....	55
Figuur 40: Hoofd HMI van de smart-grid-opstelling.....	58
Figuur 41: Voorbeeld logger BP onevenwicht	59
Figuur 42: Hoofd HMI regeling koppelen van het BP	60
Figuur 43: WindSim software en windprofiel.....	61
Figuur 44: Windturbinepark en HVDC-proefopstelling.....	61
Figuur 45: HMI gascentrale	63
Figuur 46: HMI waterkrachtcentrale.....	63
Figuur 47: Zonnepaneel-emulator software	64

Figuur 48: Aansluitpaneel batterijopslagsysteem	64
Figuur 49: HMI zonnepark met batterijopslag.....	65
Figuur 50: Hoofd HMI aansturing HVAC-proeftafel	66
Figuur 51: HMI verbruiker proeftafel	67
Figuur 52: BP logger van het onderzoek om de onbalans te herstellen met generatoren	68
Figuur 53: SCADA-regeling generatoren	69
Figuur 54: Reactie windturbine op variërende windsnelheden en windstoten	71
Figuur 55: Productiecurve windturbine.....	72
Figuur 56: SCADA-regeling windturbinepark	72
Figuur 57: Blokschema windturbine.....	73
Figuur 58: Voorbeeld manuele derating voor de balancing van het lokaal smart grid	74
Figuur 59: Logger BP bij sterk variërende wind en een belasting van 1000 W.....	75
Figuur 60: SCADA-regeling DSM	76
Figuur 61: Verbruikers proefopstelling DSM.....	77
Figuur 62: SCADA-regeling batterijopslagsysteem en PV-installatie.....	78
Figuur 63: Opgewekt vermogen PV-installatie in een week.....	79
Figuur 64: Simulatie zomerday zonder batterij.....	80
Figuur 65: Simulatie zomerday met batterij in automatische werking	81
Figuur 66: Simulatie zomerday met batterij en peak shaving	82
Figuur 67: Simulatie zomerday met 3 panelen in schaduw, schaduwsterkte 30%.....	83
Figuur 68: OLTC-regeling van de HVAC-proeftafel	84
Figuur 69: OLTC HVAC-proeftafel	85
Figuur 70: Logger OLTC-werking.....	86
Figuur 71: Generator-controle-regeling	87
Figuur 72: Overstroomrelais	88
Figuur 73: Multifunctioneel relais	88

Verklarende woordenlijst

aFRR	automatic Frequency Restoration Reserve, frequentieherstelreserve met automatische activering of secundaire reserve
AMI	Advanced Metering Infrastructure
BP	Balance Point
BRP	Balancing Responsible Party, evenwichtsverantwoordelijke
CHIL	Controller Hardware In the Loop
DBS	Distributiebeheersystemen
DDM	Dynamic Digital Mirror
DER	Distributed Energy Resources
DNB	Distributienetbeheerder
DRES	Distributed Renewable Energy Sources
DSM	Demand Side Management
DT	Digital Twin
DTLM	Digital Twin Laboratory Model
EBS	Energiebeheersystemen
EV	Elektrische voertuigen
FCR	Frequency Containment Reserve, frequentiebegrenzingsreserve of primaire reserve
FRT	Fault Ride Through
HIL	Hardware in The Loop
HMI	Human Machine Interface
HUT	Hardware Under Testing
HVAC	High Voltage Alternating Current, hoogspanningswisselstroom
HVDC	High Voltage Direct Current, hoogspanningsgelijkstroom
I/O	Input/Output
ICT	Informatie- en communicatie technologie
IED	Intelligent Electronic Device
IoT	Internet of Things
IP	Internetprotocol
LN	Lucas-Nülle
LSC	Line Side Converter
LSP	Laboratory Service Platform

mFRR	manual Frequency Restoration Reserve, frequentieherstelreserve met manuele activering of tertiaire reserve
MSC	Machine Side Converter
OLTC	On Load Tap Changer
PHIL	Power Hardware in The Loop
PLC	Programmable Logic Controller
PQ	Power Quality
PV	Photovoltaic, fotovoltaïsch
RC	Remote Control
RTS	Real Time Simulator
RTU	Remote Terminal Unit
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SGAM	Smart Grid Architecture Model
SGCC	Smart Grid Control Center
SoS	System of Systems
STATCOM	Statische synchrone compensator
TNB	Transmissienetbeheerder, in België Elia
VSP	Voltage Service Provider

Abstract

T2-campus te Genk is een opleidingscampus voor techniek en technologie. In het kader van de energietransitie werd geïnvesteerd in een *smart-grid*-labo van het bedrijf Lucas-Nülle (LN). Dit labo bestaat uit tien proeftafels die elk een deel van het elektriciteitsnet voorstellen. Door deze tafels met een SCADA-netwerk te verbinden, ontstaat een smart grid. Echter, bestond er nog geen labo-opstelling waarin de werking van dit smart grid onderzocht kon worden. En het is net het inzicht in deze werking die T2-campus via haar opleidingen wil meegeven aan de cursisten. Een bijkomend probleem is dat ondanks het grote potentieel van de labo-apparatuur, niet alle aspecten van een smart grid onderzocht kunnen worden. Simulatiesoftware en *Digital Twins* (DT's) kunnen hier een mogelijke oplossing bieden.

Het doel van deze masterproef was om een smart-grid-opstelling te ontwerpen, waarin de labo-apparatuur optimaal benut wordt. In deze opstelling moest het mogelijk zijn om de *balancing* van het net en de verschillende soorten spanningsregelingen te demonstreren en onderzoeken. Verder werd aan de hand van een literatuurstudie de meerwaarde van een DT voor het smart-grid-labo geanalyseerd.

Literatuur toont aan dat de klassieke simulatiesoftware op korte termijn een grotere meerwaarde hebben dan een DT. Met behulp van de apparatuur van LN en het SCADA-netwerk is de smart-grid-opstelling ontworpen. Software-PLC's en HMI's regelen de balancing en de spanning van het net.

Abstract in English

T2-campus in Genk is a training campus for engineering and technology. Under the energy transition domain, investments were made in a smart grid lab of the company Lucas-Nülle (LN). This lab consists of ten test benches that each represent a part of the electricity grid. A smart grid is formed by connecting these test benches to each other and to a SCADA network. However, there was no test setup yet in which the operation of this smart grid could be investigated. And it is precisely this insight into its operation that T2-campus wants to pass on to its trainees via its training courses. An additional problem is that despite the great potential of the lab equipment, it is not possible to investigate all aspects of a smart grid. Simulation software and Digital Twins (DTs) can offer a possible solution to this problem.

The goal of this master's thesis was to design a smart grid setup, in which the lab equipment is utilised to its full potential. In this setup, it had to be possible to demonstrate and investigate the balancing of the grid and the different types of voltage regulation. In addition, the added value of a DT for the smart grid lab was analysed based on a literature study.

Literature indicates that the classical simulation software has a greater added value in the short term than a DT. The smart grid setup was designed using LN's equipment and the SCADA network. Software PLCs and HMIs control the balancing and the voltage of the grid.

1. Inleiding

1.1. Situering

De energietransitie vereist de integratie van gedecentraliseerde hernieuwbare energiebronnen (zoals de wind en de zon) in ons elektriciteitsnet. Door hun stochastisch (variabel, onvoorspelbaar) opwekkingsgedrag, worden de netbeheerders geconfronteerd met een complexer beheer van de elektriciteitsnetten. Naast de veranderende aard van de energievoorziening komen nog nieuwe vormen van energievraag, zoals opladen van elektrische voertuigen (EV) en warmtepompen. Om deze veranderingen op te vangen zal de fysieke infrastructuur uitgebreid of versterkt moeten worden. Omdat dit grote kosten met zich meebrengt, worden slimme oplossingen ingevoerd, waarbij communicatie, sensoren en automatisering de distributienetbeheerders (DNB's) ondersteunen om de variërende opwekking en vraag actief te kunnen beheren. De combinatie van het veranderend elektriciteitsnet en de slimme IT-oplossingen zijn typische kenmerken van een *smart grid*, het elektriciteitsnet van de toekomst.

De masterproef vindt plaats in samenwerking met de T2-campus te Genk, een opleidingscampus voor techniek en technologie voor leerlingen, werknemers en werkzoekenden. T2-campus wil zoveel mogelijk TECH-“goesting” creëren met zijn aanbod van meer dan 300 opleidingen. Op deze campus bundelen de projectpartners SyntraPXL, VDAB en de Stad Genk hun expertise voor gespecialiseerde en duurzame opleidingen in techniek en technologie. T2-campus is gelegen in het Thor Park, een technologiepark met specialisatie in slimme energie en slimme maakindustrie [1].

In het kader van de energietransitie heeft T2-campus geïnvesteerd in verschillende hightech labo's, waaronder het smart-grid-labo. Dit smart-grid-labo bestaat uit het Lucas-Nülle (LN)-opleidingssysteem voor elektrotechniek. Dit opleidingssysteem bevat tien verschillende proeftafels die verschillende onderdelen van het elektriciteitsnet voorstellen: productie-installaties, transport- en distributielijnen, verbruikers, transformatoren, opslagsystemen... Het labo wordt ondersteund met een SCADA-systeem en Power-LAB-software.

SCADA staat voor *Supervisory Control And Data Acquisition* en wordt gebruikt voor het besturen en het monitoren van technische processen en systemen [2]. In de Power-LAB-software kunnen meetwaarden en bedrijfstoestanden van de proeftafels in *real-time* worden weergegeven. Parameters kunnen aangepast worden en controlesignalen worden verstuurd naar de verschillende proeftafels. Met de apparatuur en de software beschikbaar in het smart-grid-labo is het mogelijk om een klein lokaal smart grid op te bouwen en scenario's uit de werkelijkheid te demonstreren.

Een andere manier voor het onderzoeken van deze scenario's is het gebruiken van geavanceerde simulatietechnieken of een *Digital Twin* (DT). DT's worden gedefinieerd als digitale representaties van potentiële of werkelijke fysieke systemen die via betrouwbare communicatieverbindingen met de werkelijke tegenhanger zijn verbonden om een bidirectionele gegevensuitwisseling tot stand te brengen [3]. Het is dus een digitale tweeling of representatie van het fysieke, werkelijke systeem.

1.2. Probleemstelling

In het smart-grid-labo zijn verschillende handleidingen met laboproeven van LN zelf beschikbaar. Deze handleidingen zijn zeer uitgebreid en beschrijven gedetailleerd welke handelingen de gebruiker moet uitvoeren om de bijhorende proef uit te voeren. Echter, de handleidingen focussen meer op de uitgebreide mogelijkheden van de apparatuur dan op het inzicht in de werking van smart-grid-technologieën en systemen. En het is net dit inzicht in de werking van smart grids dat T2-campus via haar opleidingen wil meegeven aan de cursisten.

Bovendien zijn in de handleidingen van LN nauwelijks proeven beschreven waarbij de proeftafels met elkaar verbonden worden tot een lokaal smart grid. Het potentieel van de apparatuur is niet ten volle benut en een groot aantal aspecten van de werking van een smart grid worden niet belicht. De software achter de SCADA-regeling is ook niet geprogrammeerd om het demonstreren en doortesten van deze andere aspecten te ondersteunen.

Een derde probleem is dat het ontwikkelen van nieuwe laboproeven en de opbouw van het lokaal smart grid veel tijd kost, en dat de apparatuur ondanks veel potentieel niet alle mogelijke testen en metingen toelaat. Hierdoor kan de volledige werking van een werkelijk smart grid niet onderzocht worden. Simulatiesoftware, *hardware-in-the-loop* (HIL)-systemen en DT's kunnen hier een oplossing voor bieden. Maar voorlopig is nog geen onderzoek gedaan naar de meerwaarde hiervan voor het smart-grid-labo. Het doel van het lab is louter educatief, het smart-grid-labo wordt niet-gebruikt voor onderzoek of de optimalisatie van componenten of systemen.

1.3. Doelstellingen

De masterproef heeft twee grote doelstellingen. Het ontwerpen van een smart-grid-opstelling met maximale test- en aanstuurmogelijkheden en het onderzoeken van de meerwaarde van een DT voor het smart-grid-labo.

De eerste doelstelling is tweedelig. Enerzijds moet de smart-grid-opstelling optimaal gebruikmaken van de infrastructuur van het lab. Dit wil zeggen dat de tien verschillende proeftafels aan elkaar gekoppeld worden tot een operationeel lokaal smart grid. Anderzijds moet deze smart-grid-opstelling zoveel mogelijk aspecten van de werking van een smart grid kunnen demonstreren. Dit gebeurt aan de hand van twee scenario's die gerealiseerd moeten worden, namelijk de *balancing* van het net en het onderzoeken van de verschillende soorten spanningsregelingen en beveiligingen die aanwezig zijn in een smart grid. In de opstelling moet het mogelijk zijn om het complete smart grid in real-time te monitoren en te regelen vanuit één centraal punt, het controlecentrum. Dit controlecentrum is één van de tien proeftafels.

Voor het onderzoeken van de meerwaarde van een DT uit de tweede doelstelling, dient een onderbouwde analyse gemaakt te worden. In deze analyse moeten de concepten van smart grids, DT's, DT's voor smart-grid-systemen en DT's in een labo-omgeving onderzocht worden.

1.4. Methode

Voor het ontwerpen van de smart-grid-opstelling moet eerst het potentieel van de labo-infrastructuur onderzocht worden. Dit gebeurt door de tien verschillende proeftafels en de bijhorende handleidingen van LN door te nemen. Vervolgens worden de ontwerpeisen vastgesteld waaraan de opstelling moet voldoen. Daarna wordt een principeschema opgesteld van de opstelling waarin de tien proeftafels aan elkaar gekoppeld zijn. Dan wordt stapsgewijs de verbinding tussen deze proeftafels opgebouwd tot al de nodige onderdelen uit het principeschema geïntegreerd zijn in de opstelling. Uiteindelijk is de fysieke opbouw van het lokaal smart grid gerealiseerd.

Voor de werking van het smart grid te demonstreren, worden intussen in samenspraak met T2-campus de scenario's van de balancing en de spanningsregelingen nader gedefinieerd. Met behulp van het SCADA-systeem en de Power-LAB-software wordt de inregeling van de labo-apparatuur geprogrammeerd en getest. Hiermee is het mogelijk om deze scenario's te demonstreren. De volgende stap is het testen van de smart-grid-opstelling. In mei 2021 is de opstelling uitgetest en geëvalueerd door master-studenten Energie. Op basis van hun bevindingen is bijsturing mogelijk.

Het maken van de onderbouwde analyse naar de meerwaarde van een DT voor het smart-grid-labo gebeurt op basis van een uitgebreide literatuurstudie.

1.5. Vooruitblik

Het volgende hoofdstuk is de literatuurstudie die vormt de basis vormt voor het maken van een onderbouwde analyse naar de meerwaarde van een DT voor het smart-grid-labo van de T2-campus. De eerste stap in deze analyse is het bekend raken met beide onderwerpen, namelijk smart grids en DT's. Het eerste deel van de literatuurstudie omvat onderzoek naar smart grids, smart-grid-technologieën en de analogie met het smart-grid-labo. Het tweede deel beschrijft algemeen DT's, DT's voor smart-grid-systemen en DT's in een labo-omgeving. Ten slotte volgt de conclusie.

Hoofdstuk 3 beschrijft in detail de materialen en de methode die gebruikt zijn voor het ontwerpen van de smart-grid-opstelling. In dit hoofdstuk wordt eerst de labo-infrastructuur duidelijk uitgelegd, zodat de lezer een goed beeld heeft van de componenten aanwezig in het smart-grid-labo. Vervolgens zijn de ontwerpeisen van de smart-grid-opstelling opgesomd. Dan is de structuur van de SCADA van de smart-grid-opstelling besproken. En ten slotte zijn de theoretische achtergronden van de scenario's beschreven die gedemonstreerd moeten worden.

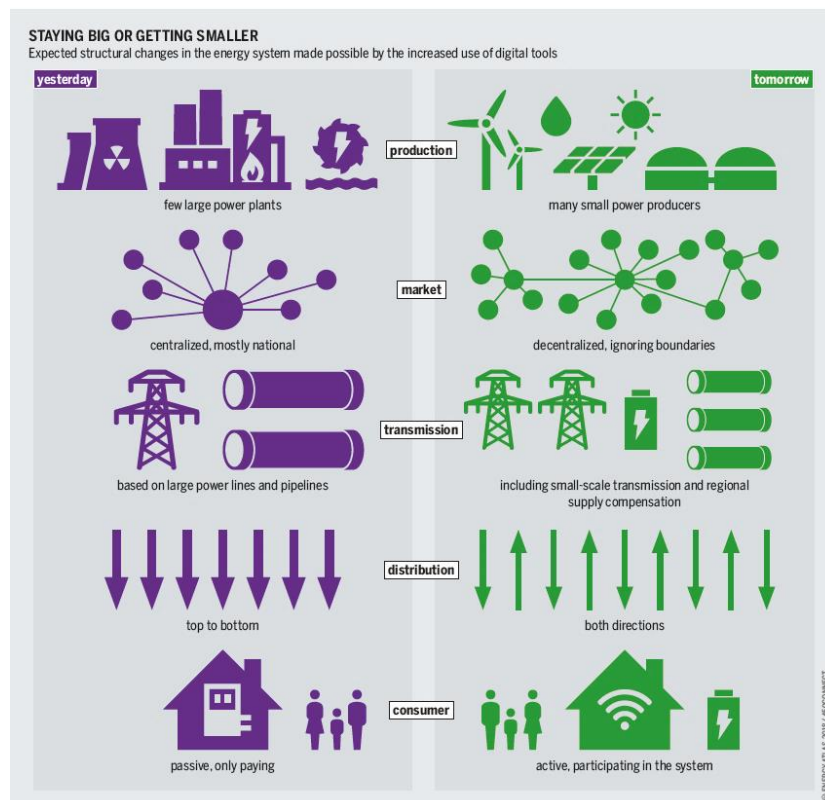
Hoofdstuk 4 bespreekt de resultaten van de smart-grid-opstelling. En het laatste hoofdstuk, hoofdstuk 5 bespreekt de conclusie van de masterproef en de mogelijkheden voor T2-campus om het smart-grid-labo uit te breiden of gedetailleerder onderzoek te doen.

2. Literatuurstudie

2.1. Smart grids

2.1.1. Definitie

Een smart grid heeft niet één universele definitie. De drie Europese Standaardisatie Organisaties (ESOs) CEN (Comité Européen de Normalisation), CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) en ETSI (Europees Telecommunicatie en Standaardisatie Instituut) omschrijven een smart grid als volgt: een smart grid is een elektriciteitsnet dat de handelingen van alle aangesloten gebruikers (generatoren, verbruikers en degenen die beide doen) op een intelligente manier kan integreren om op een efficiënte manier een duurzame, economische en veilige elektriciteitsvoorziening te leveren [4], [5]. Het Nationaal Instituut van Standaarden en Technologie (NIST) in de Verenigde Staten definieert een smart grid als “een gemoderniseerd net dat bidirectionele energiestromen toelaat en gebruik maakt van tweerichtingscommunicatie en controle mogelijkheden die zullen leiden tot een hele reeks nieuwe functionaliteiten en toepassingen” [3, p. 14]. De mogelijkheden van smart grids zijn zeer breed, de integratie van digitale technieken en andere technologieën in het elektriciteitsnet zal de productie, transmissie, distributie en het verbruik van elektrische energie efficiënter, betrouwbaarder, rendabeler en duurzamer maken [7]–[11]. Figuur 1 toont schematisch een overzicht van de vergelijking van het traditioneel elektriciteitsnet en het energienet van de toekomst.

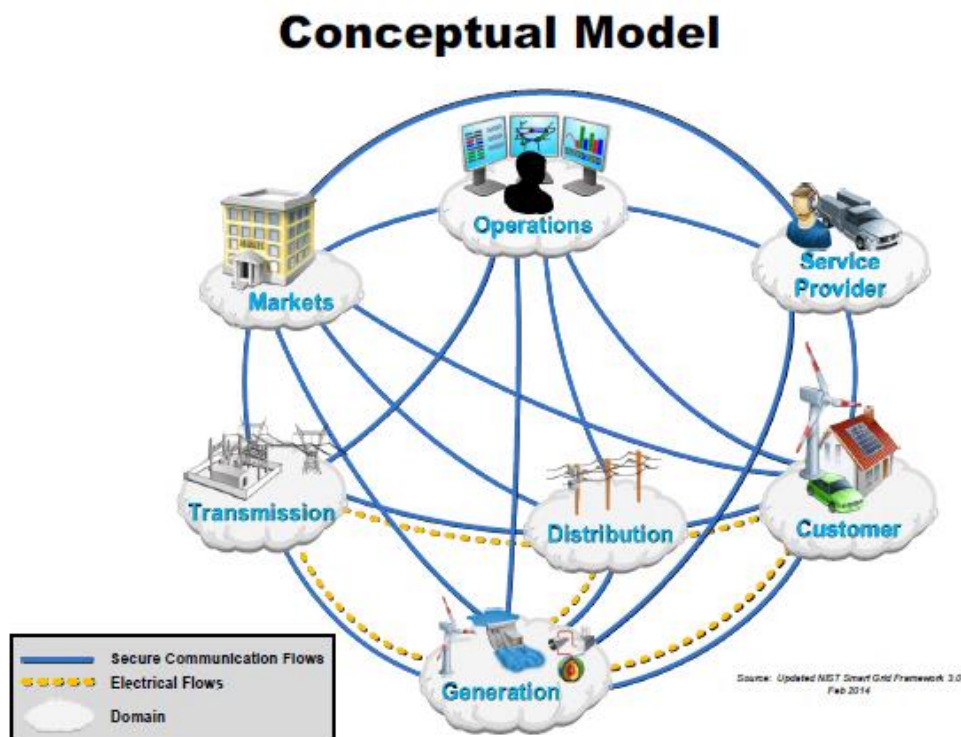


Figuur 1: Traditioneel net en het net van de toekomst [12, p. 33]

2.1.2. Smart grid conceptueel en architectuur model

Smart-grid-projecten maken gebruik van verschillende combinaties van *runtime*-omgevingen, software en algoritmen, onderdelen van verschillende leveranciers en fabrikanten. De systemen die onder het toepassingsgebied van een smart grid vallen, moeten beschouwd worden als een complex *System-of-Systems* (SoS). Door dit complex systeem van systemen is het vinden van een “beste” benadering of oplossing voor het implementeren van smart grid technologieën moeilijk [13]. De architectuur van een systeem is een belangrijk element om te werken aan een gemeenschappelijk smart-grid-project, met dit complex SoS is het van belang om rekening te houden met de interoperabiliteit tussen bestaande systemen en de betrokken partijen. Interoperabiliteit is de mogelijkheid van twee of meer systemen (apparaten of componenten) om informatie uit te wisselen en die informatie te gebruiken voor een correcte samenwerking. Het bereiken van interoperabiliteit in een dergelijk grootschalig, gedistribueerd systeem vereist de nodige standaarden en richtlijnen. Deze worden geleverd door het *Smart Grid Architecture Model* (SGAM) [6], [13].

Het SGAM is een model om te volgen bij het ontwerp van een smart-grid-architectuur. SGAM heeft drie hoofddassen voor het beschrijven van een smart-grid-architectuur: domeinen, zones en de interoperabiliteit [13]. De verschillende domeinen van het SGAM zijn gebaseerd op het NIST conceptueel model van een smart grid (Figuur 2). Dit model verdeelt een smart grid in zeven domeinen. Elk domein omvat de conceptuele rollen en diensten van het smart grid [6].



Figuur 2: Conceptueel model van een smart grid [6, p. 128]

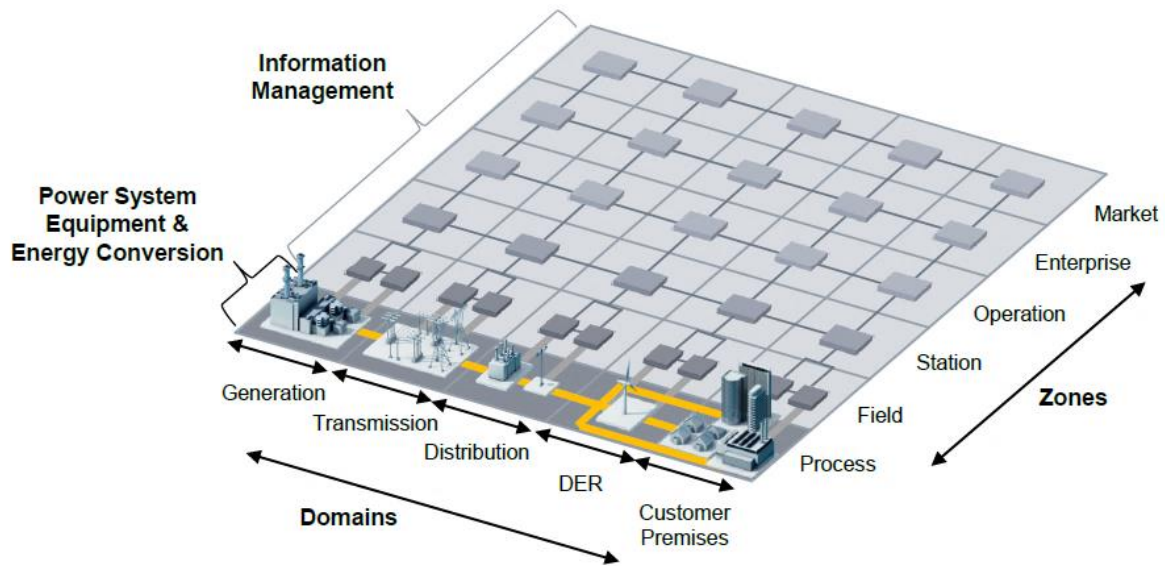
De eerste hoofdas uit het SGAM zijn de domeinen, deze stellen in principe dezelfde energieomzettingsketen voor, zoals beschreven in het conceptueel model van NIST [6]. De afzonderlijke domeinen zijn als volgt beschreven [13], [14]:

- **Bulk generation:** vertegenwoordigt de opwekking van elektriciteit in bulkhoeveelheden, zoals door fossiele, nucleaire en waterkrachtcentrales, offshore windparken, grootschalige zonne-energiecentrales (d.w.z. fotovoltäische- (PV) en geconcentreerde zonne-energie), die doorgaans zijn aangesloten op het transmissiesysteem.
- **Transmission:** verwijst naar de infrastructuur die elektriciteit over lange afstanden vervoert.
- **Distribution:** betreft de infrastructuur die de elektriciteit aan de consumenten distribueert.
- **Distributed Energy Resources (DER):** gaat over de gedistribueerde elektrische bronnen die rechtstreeks zijn aangesloten op het openbare distributienet, waarbij gebruik wordt gemaakt van kleinschalige energieopwekkingstechnologieën (doorgaans in het bereik van 3-10 MW). Deze gedistribueerde elektrische bronnen kunnen rechtstreeks worden gecontroleerd door een DNB.
- **Customer premises:** omvat de gebouwen van de klanten, zowel eindgebruikers van elektriciteit als producenten van elektriciteit. Het domein omvat industriële, commerciële en thuisfaciliteiten (bv. chemische fabrieken, luchthavens, havens, winkelcentra en woningen). Daarnaast wordt de productie in de vorm van bijvoorbeeld PV-productie, elektrische voertuigen, opslag, batterijen, microturbines, etc. aangeboden.

De tweede hoofdas zijn de zones, deze staan loodrecht op de domeinen en vertegenwoordigen de op ICT gebaseerde controlesystemen, die de energieomzettingsketen controleren [13]. De afzonderlijke zones zijn als volgt beschreven [13], [14]:

- **Process:** omvat de fysieke, chemische of ruimtelijke transformaties van energie (elektriciteit, zon, warmte, water, wind ...) en de fysieke apparatuur die er rechtstreeks bij betrokken is (bv. generatoren, transformatoren, stroomonderbrekers, bovengrondse leidingen, kabels, elektrische belastingen, alle soorten sensoren en actuatoren die deel uitmaken van of rechtstreeks verbonden zijn met het proces).
- **Field:** betreft apparatuur om het proces van het elektriciteitssysteem te beschermen, te controleren en te monitoren, bijvoorbeeld beveiligingsrelais, *bay-controller* en allerlei *intelligent electronic devices* (IED's) die procesgegevens van het elektriciteitssysteem verkrijgen en gebruiken.
- **Station:** vertegenwoordigt het gebiedsaggregatieniveau voor het fieldniveau, bv. voor dataconcentratie, functionele aggregatie, automatisering van onderstations, lokale SCADA-systemen, supervisie van centrales, etc.
- **Operation:** deze zone bevat de bediening van het energiesysteem in het betreffende domein, bv. distributiebeheersystemen (DBS), energiebeheersystemen (EBS) in opwekkings- en transmissiesystemen, beheersystemen voor *micro grids*, virtuele beheersystemen voor elektriciteitscentrales (waarbij verschillende DER worden samengevoegd), en systemen voor het laadbeheer van elektrische wagenparken.
- **Enterprise:** omvat commerciële en organisatorische processen, diensten en infrastructuren voor ondernemingen (nutsbedrijven, serviceproviders, energiehandelaren, etc.), bv. vermogensbeheer, logistiek, personeelsbeheer, personeelstraining, klantenrelatiebeheer, facturering, etc.
- **Market:** geeft de marktwerking weer die mogelijk is in de energieomzettingsketen, bv. de energiehandel, de groothandelsmarkt, de kleinhandelsmarkt, etc.

Als we deze domeinen en zones uitzetten krijgen we het smart-grid-vlak (zie Figuur 3). Dit smart-grid-vlak maakt het mogelijk om weer te geven op welke niveaus (hiërarchische zones) van energiesysteembeheer interacties tussen domeinen plaatsvinden. Het smart-grid-vlak omvat de volledige elektrische energieomzettingsketen doorheen de verschillende zones [14].

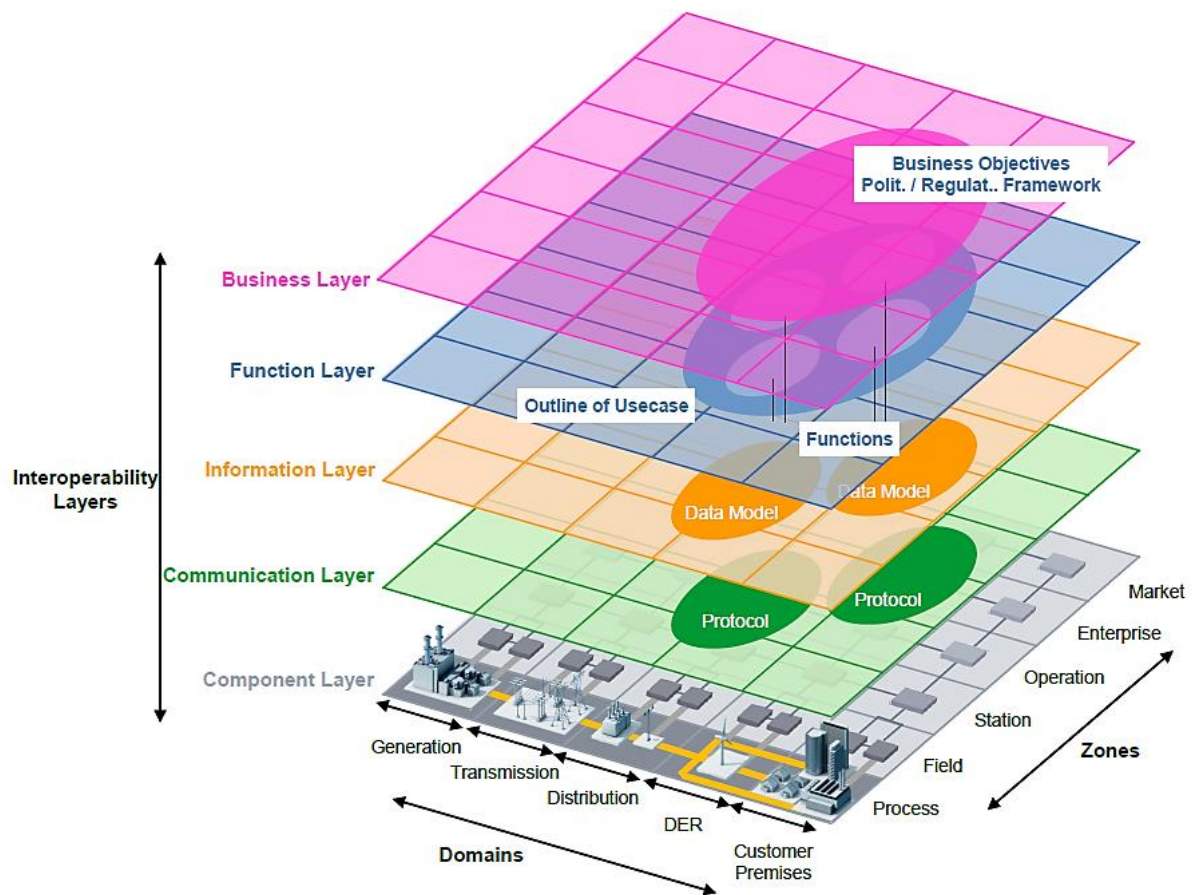


Figuur 3: Smart-grid-vlak - domeinen en hiërarchisch zones [14, p. 28]

De derde en laatste hoofdas is de interoperabiliteit, om de interoperabiliteit tussen twee onderdelen van het smart grid te garanderen, moet de interoperabiliteit op vijf verschillende lagen bekeken worden. Deze vijf interoperabiliteitslagen zijn als volgt beschreven [13], [14]:

- **Business layer:** biedt een economische kijk op de informatie-uitwisseling met betrekking tot smart grids. Regelgevende en economische structuren kunnen op deze laag in kaart worden gebracht.
- **Function layer:** beschrijft functies en diensten inclusief hun relaties vanuit architecturaal oogpunt. De functies worden onafhankelijk van actoren en fysieke implementaties in applicaties, systemen en componenten weergegeven.
- **Information layer:** beschrijft de informatie die wordt gebruikt en uitgewisseld tussen functies, diensten en componenten. Het bevat informatieobjecten en de onderliggende bijhorende datamodellen.
- **Communication layer:** beschrijft protocollen en mechanismen voor de interoperabele uitwisseling van data tussen componenten in de context van de onderliggende use-case, functie of dienst en gerelateerde informatieobjecten of datamodellen.
- **Component layer:** fysieke verdeling van alle deelnemende componenten in de context van het smart grid. Dit omvat systeemactoren, toepassingen, apparatuur voor energiesystemen (meestal op proces- en veldniveau), beschermings- en bedieningsapparatuur, netwerkinfrastructuur (bekabelde/ draadloze communicatieverbindingen, routers, switches, servers) en alle soorten computers.

Het SGAM is verkregen door het concept van de interoperabiliteitslagen samen te voegen met het eerder geïntroduceerde smart-grid-vlak. Figuur 4 is de visuele weergave van het SGAM, hier kunnen systemen en hun interfaces worden toegewezen aan een bepaald punt in het referentiemodel, waardoor een categorisering en classificatie van afzonderlijke onderdelen, uitgewisselde data en interfaces van het systeemlandschap mogelijk wordt [13].



Figuur 4: Het SGAM [14, p. 30]

2.2. Smart grid technologie

2.2.1. Advanced Metering Infrastructure (AMI)

In smart grids wordt geavanceerde meetinfrastructuur (AMI) gebruikt, deze meet en verzamelt het energieverbruik. De verzamelde data worden heen en weer gestuurd over een tweerichtingscommunicatienetwerk dat IED's (slimme meters) en de regelsystemen van nutsbedrijven met elkaar verbindt. AMI verbindt de consument met het distributiesysteem. Verder zorgt het slim meten ook voor het meten van de kwaliteit van het geleverd vermogen. Slimme meters maken het mogelijk om de energiestromen binnen het distributiesysteem gedetailleerd te monitoren. Dit is belangrijk zodat de DNB's in staat zijn om snel te reageren op schommelingen in het elektrisch verbruik [15].

2.2.2. Demand Side Management (DSM)

Vraagrespons is door de Federal Energy Regulatory Commission (FERC) gedefinieerd als “veranderingen in het elektriciteitsverbruik door hulpbronnen aan de vraagzijde ten opzichte van hun normale verbruikspatronen als reactie op veranderingen in de elektriciteitsprijs in de loop van de tijd, of op stimuleringsbetalingen die bedoeld zijn om een lager elektriciteitsverbruik te veroorzaken in tijden van hoge groothandelsmarktprijzen of wanneer de betrouwbaarheid van het systeem in gevaar komt” [16]. Vraagrespons biedt de consumenten de kans om betrokken te zijn bij het beheer van het net, om vraag en aanbod van energie in evenwicht te houden. Door DSM toe te passen kunnen de meest geavanceerde smart grids huishoudelijke apparaten monitoren en regelen, mits toestemming van de consument. Dit betekent dat deze apparaten tijdens piekuren uitgeschakeld kunnen worden om de vraag naar stroom te verminderen, en hun functie kunnen herstellen tijdens de niet-piekuren [11].

2.2.3. Distributed Renewable Energy Sources (DRES)

DER zijn kleine gedecentraliseerde energiebronnen die helpen om het evenwicht te bewaren tussen de vraag en het aanbod van energie. Deze energie wordt lokaal opgewekt, in het geval van hernieuwbare energiebronnen spreken we over DRES. In de “*European Green Deal*” heeft de Europese Unie (EU) enkele doelstellingen gezet voor de vermindering van broeikasgasemissies. In 2030 verwacht de EU haar broeikasgasemissies vermindert te hebben met 55%. De EU streeft ernaar tegen 2050 klimaatneutraal te zijn met een netto uitstoot van broeikasgassen van nul [17], [18]. Om dergelijke doelstellingen te kunnen verwezenlijken, wordt een steeds groter aandeel van de DRES op onze elektriciteitsnetten aangesloten. DRES bestaan voornamelijk uit windgeneratoren, PV-generatoren en batterijopslagsystemen (zonnecellbatterijen en EV). Dankzij smart-grid-technologie kunnen deze DER rechtstreeks gecontroleerd worden vanop afstand [14], [19].

2.2.4. Internet of Things (IoT)

Het IoT is de onderlinge verbinding van alledaagse apparaten “dingen” die via het internet gegevens kunnen verzenden en ontvangen. De IoT-technologie helpt met het beperken van de overdracht van grote hoeveelheden data tussen de gebruikers en het nutsbedrijf via een IP (internetprotocol). Het IoT in het smart grid heeft verscheidene voordelen. Het IoT helpt om een vlotte en efficiënte communicatie tot stand te brengen tussen de verschillende entiteiten in het smart grid, zoals de slimme meters op de locatie van de consument en de sensoren voor het in- en uitschakelen van de apparatuur in functie van de verbruikspatronen en de belasting van het net.

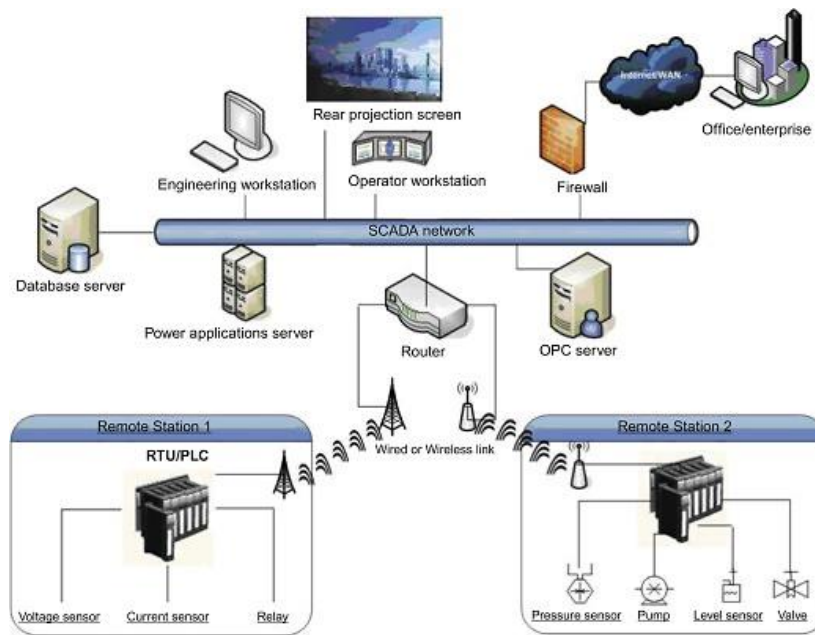
Dankzij het IoT kan de DSM doeltreffender gebeuren. Er zullen betere gegevensanalyses worden uitgevoerd door alle gegevens van de slimme meters en de verbonden apparaten te meten. Hierdoor kan er op een competente manier energiemaatregelen getroffen worden [20].

2.2.5. SCADA

Het SCADA-systeem van het smart grid integreert digitale geavanceerde communicatiesystemen waardoor uitwisseling van data tussen de verschillende entiteiten binnen het distributienet mogelijk wordt. Vanuit controlecentra kunnen operatoren dankzij het SCADA-systeem DBS monitoren en regelen zodat deze optimaal functioneren. De belangrijkste functie van een SCADA-systeem voor smart grids is het ondersteunen van gedistribueerde opwekking, schakelprocedures, alarmering bij het optreden van fouten of storingen, communicatie, loggen van gebeurtenissen, registratie van metingen en besturing op afstand van apparatuur uit de DBS.

SCADA-systemen zijn in feite procescontrolesystemen die real-time data verzamelen, monitoren en analyseren van bijvoorbeeld eenvoudige residentiële gebouwen tot complexe grootschalige PV- of windkrachtcentrales of het elektriciteitsnet zelf. Sommige procescontrolesystemen bestaan uit één of meer soorten data-acquisitie-apparaten zoals *remote terminal units* (RTU's) en/of *programmable logic controllers* (PLC's) die verbonden zijn met een bepaald aantal veldapparaten uit de *field-zone* van het SGAM. Deze apparaten zijn meestal sensoren, digitale "slimme" meters, beveiligingsrelais en alarmeringsapparatuur [11], [21], [22]. SCADA-systemen (Figuur 5) zijn samengesteld uit de volgende apparatuur [11], [21]:

- **Bedieningsapparatuur en hardware:** apparatuur voor bediening op afstand, zoals schakelingen van stroomtransformatoren of spanningstransformatoren, kleppen en stroomonderbrekers die lokaal of op afstand kunnen worden bediend.
- **Lokale onderstations:** verzamelen gegevens van de veldapparaten en de hardware, waaronder de RTU's, PLC's en IED's, zoals digitale relais en digitale meters. In het lokale onderstation wordt data uit analoge en digitale *inputs/outputs* (I/O) van deze IED's en schakelapparatuur verzameld en uitgewisseld.
- **Digitale instrumenten:** deze worden gewoonlijk in het veld of in een centrale geïnstalleerd en meten grootheden zoals stroom, spanning, zonne-instralingssterkte, temperatuur, druk, windsnelheid en debiet.
- **Communicatieapparatuur:** kan zowel voor korte-afstands- als lange-afstandscommunicatie. Korte-afstandscommunicatie wordt geïnstalleerd tussen lokale RTU's, instrumenten en bedieningsapparatuur. Dit zijn kabels over relatief korte afstand of draadloze verbindingen die digitale en analoge signalen overbrengen met behulp van elektrische eigenschappen, zoals spanning en stroom, of andere gebruikelijke industriële communicatieprotocollen. Communicatie over lange afstand wordt geïnstalleerd tussen lokale processoren RTU/PLC en een *OPC-server* (*Open Platform Communications*).
- **Host computers/servers:** de host-server is de database-server deze heeft zijn eigen host-computer. Als centraal punt voor monitoring en controle bevindt deze server zich in de controlekamer of het hoofdstation. Het werkstation is de plaats waar een ingenieur of operator toezicht kan houden op het proces, systeemalarmen kan ontvangen, gegevens kan bekijken en het proces op afstand kan bedienen. De verzamelde data van sensoren en digitale instrumenten worden gewoonlijk bekeken op één of meer SCADA-host-computers in het hoofdstation.



Figuur 5: SCADA-systeem netwerk [11, p. 484]

2.3. Smart-grid-structuur van het smart-grid-labo

Hiervoor is het concept van een smart grid, de structuur van het SGAM en verschillende smart-grid-technologieën besproken. In de infrastructuur van het smart-grid-labo op de T2-campus zijn veel van deze aspecten te herkennen. De proeftafels van het smart-grid-labo stellen elk een domein van het SGAM voor. Deze proeftafels kunnen met elkaar gekoppeld worden waardoor er verscheidene interacties tussen de proeftafels kunnen plaatsvinden. Deze interacties zijn vergelijkbaar met de zones uit het smart-grid-vlak van Figuur 3. Omdat het smart-grid-labo voor educatieve doeleinden gemaakt is, zijn de laatste twee zones, *enterprise* en *market*, niet terug te vinden in het lab. Het smart-grid-labo is niet te vergelijken met een werkelijk smart grid. De proeftafels van het labo bestaan uit fysieke hardware componenten, zoals IED's, stroomonderbrekers, relais, etc. Deze componenten vormen samen de AMI en de eerste interoperabiliteitslaag van het SGAM, namelijk de *component layer*.

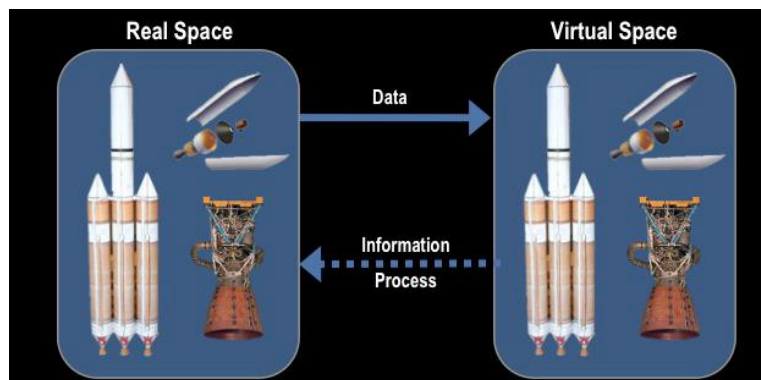
Verder bevat elke proeftafel in het lab een eigen computer, een proeftafel kan dan gezien worden als een workstation. Deze computers zijn met elkaar verbonden in een lokaal netwerk met één centrale host-computer-server, dit vormt een lokaal SCADA-netwerk. Dit SCADA-netwerk verzorgt de communicatie tussen de stations en vormt de *communication layer* van het SGAM. De uitwisseling van data wordt bestuurd via software-PLC's dit is te vergelijken met de *information layer* van het SGAM. Dankzij de software-PLC's kunnen regelacties geprogrammeerd worden die de component layer van het smart-grid-labo aansturen, deze regelacties vormen de *function layer* van het SGAM.

In hoofdstuk 3 worden de structuur van het lab en de materialen uitgebreid besproken. In de werkelijkheid is een smart grid een complex SoS waarbij interoperabiliteit tussen de verschillende entiteiten van cruciaal belang is. Het is niet mogelijk om alles uit een werkelijk smart grid in een labo-omgeving op een simpele manier te representeren. Er zijn alvast veel kenmerken van een smart grid in het lab te herkennen, maar niet alles. Zo is de *business layer* niet aanwezig, maar de rest van het SGAM wel.

2.4. Digital Twins

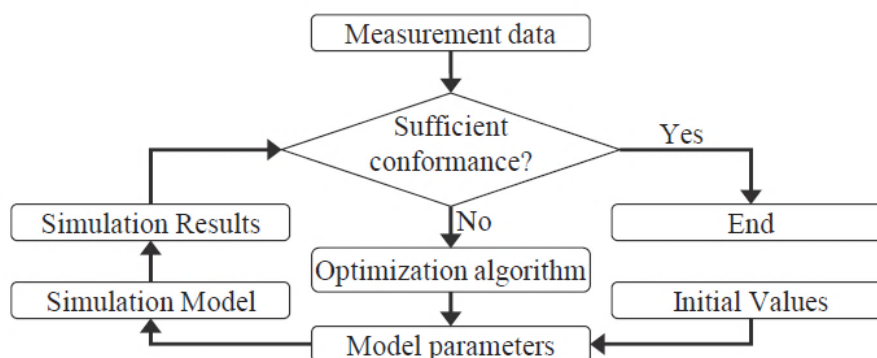
2.4.1. Definitie

De term DT dateert van 2003 en werd geïntroduceerd door Grieves en later gedocumenteerd in een witboek waarin de basis werd gelegd voor de ontwikkelingen van een DT [23]. Een DT kan simpelweg gedefinieerd worden als een virtuele replica van een object uit de fysieke wereld (zie Figuur 6). De omgeving die een DT repliceert vereist een basisstructuur, *end-to-end* connectiviteit, een communicatieprotocol en een gestandaardiseerd dataformaat waarmee de virtuele replica kan communiceren met zijn fysieke tegenhanger [24]. Met behulp van simulaties en sensorfeedback kan een DT informatie uit de simulatie terugsturen naar het fysieke model, en hierdoor het gedrag van het fysieke object beïnvloeden [25]. De DT vindt zijn oorsprong in de industriële productie, maar kan op vele gebieden worden toegepast. Het onderzoek naar DT's voor energiesystemen bevindt zich echter nog in het beginstadium.



Figuur 6: Digital Twin concept [23, p. 2]

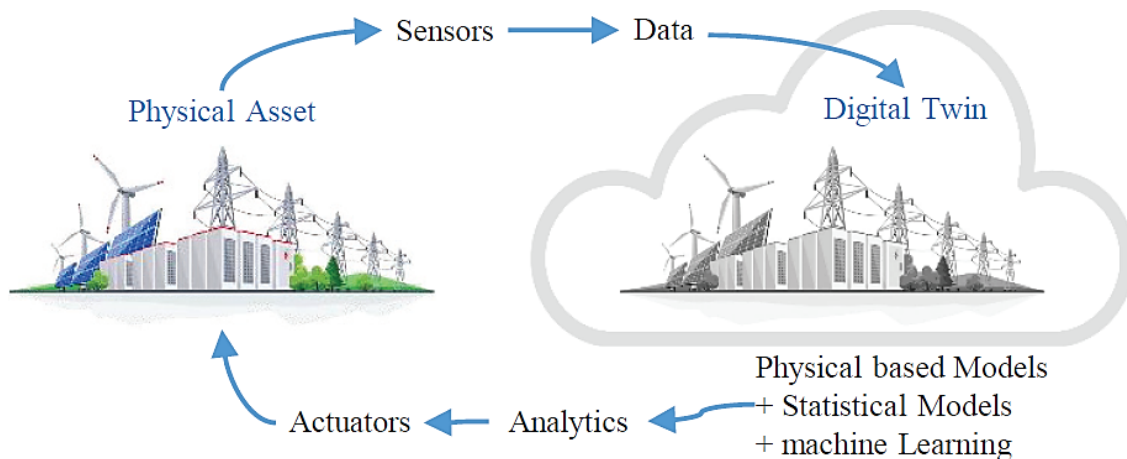
In zijn basisvorm is een DT dus een *up-to-date* weergave, replica, een model van een werkelijke operationele fysieke *asset*. Naast dat een DT een virtuele kopie is van een fysieke asset bevat dit model historische gegevens over deze asset. Door het integreren van op fysica gebaseerde simulatie modellen en statistische modellen voor data-analyse, kunnen DT's gebruikt worden om de huidige toestand van de asset te evalueren en - nog belangrijker - zijn toekomstig gedrag te voorspellen. Verder kan een DT nog uitgebreid worden met mogelijkheden om aan *machine learning* te doen, op deze manier kan de DT gebruikspatronen onderscheiden en controlebeslissingen nemen. Zo ontstaat een optimalisatie algoritme waardoor de besturing van de fysieke asset verfijnd wordt en de werking ervan geoptimaliseerd [25]–[28]. Figuur 7 toont een voorbeeld *flowchart* van het werkingsproces van een DT zoals hierboven beschreven is.



Figuur 7: Flowchart optimalisatie algoritme DT [28, p. 3]

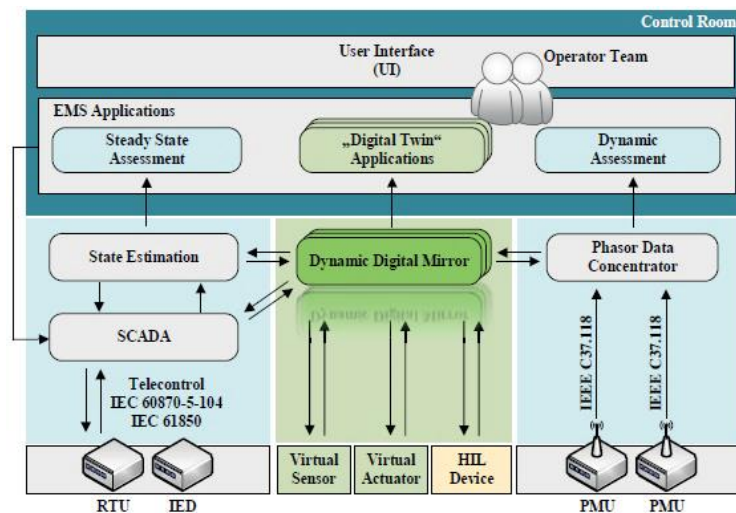
2.4.2. Digital Twins voor smart-grid-systemen

Een smart grid is een complex SoS, het ontwerpen van een DT voor smart-grid-systemen is niet vanzelfsprekend. In de literatuur is er weinig te vinden over DT's van dynamische energiesystemen, omdat DT's nog niet in de praktijk gebruikt worden binnen het smart-grid-domein. Het modelleren van deze energiesystemen of smart-grid-systemen is zeer complex. Figuur 8 geeft de representatie van een DT voor een distributienet weer, de sensoren verzamelen data uit het fysieke distributienet en brengen deze over naar de virtuele replica. In de DT wordt de data geanalyseerd op basis van de modellen van de fysieke assets enerzijds, en statistische modellen anderzijds. Met behulp van machine learning wordt de analyse geoptimaliseerd en wordt deze via actuatoren terug overgebracht naar de fysieke tegenhangen voor de bediening van bijvoorbeeld een EBS [28].



Figuur 8: Representatie van een DT in een distributienet [28, p. 1]

DT's worden nog niet gebruikt voor het monitoren en regelen van smart-grid-systemen, maar mogelijke concepten en benaderingen zijn reeds in discussie. In [24], [25], [28]–[32] zijn verschillende benaderingen voor het implementeren van DT's in EBS onderzocht. Vervolgens zijn er concepten ontworpen die in de toekomst gebruikt kunnen worden als basis voor het ontwerp van een DT voor smart-grid-systemen. Een terugkerend concept is dit van een *dynamic-digital-mirror* (DDM) [29], [31], [32]. Een DDM is een dynamisch model dat de toestand van het smart-grid-systeem in real-time weergeeft. Afhankelijk van de toepassing wordt een DDM ontworpen uit de gegevenspool van de asset operator, bestaande uit een complex distributienetmodel, de actuele gegevens van de assets en de toestand van de assets. Een DDM ondersteunt dynamische modellering en beschrijft het dynamische gedrag van het systeem, waardoor de functionaliteit veel verder gaat dan een SCADA-database. Een DDM is te beschouwen als een voortdurend draaiende modelleermachine, die de werkelijke werkingstoestand van de assets in real-time weergeeft. Afhankelijk van de doelstelling kan een DDM een aangepast model van het gehele complexe smart grid of EBS zijn, of slechts aspecten of delen daarvan weergeven [29], [31]. Figuur 9 is een schematische weergave van het DDM-concept toegepast op een controle centrum voor een EBS. In deze figuur is de structuur van een dynamisch controle centrum van een EBS, ondersteund door een SCADA-netwerk in de blauwe kaders weergegeven, dit is de fysieke ruimte. De groene kaders bevatten de DDM, deze is de virtuele ruimte en heeft bidirectionele verbindingen met de verschillende entiteiten van het EBS. De gele kader wijst op een mogelijke uitbreiding om HIL-simulatie te integreren. Deze HIL-simulatie wordt gebruikt om - zoals de naam suggereert - hardware-apparaten te testen. Deze soort simulatie kan voor het smart-grid-labo mogelijks ook meerwaarde bieden.



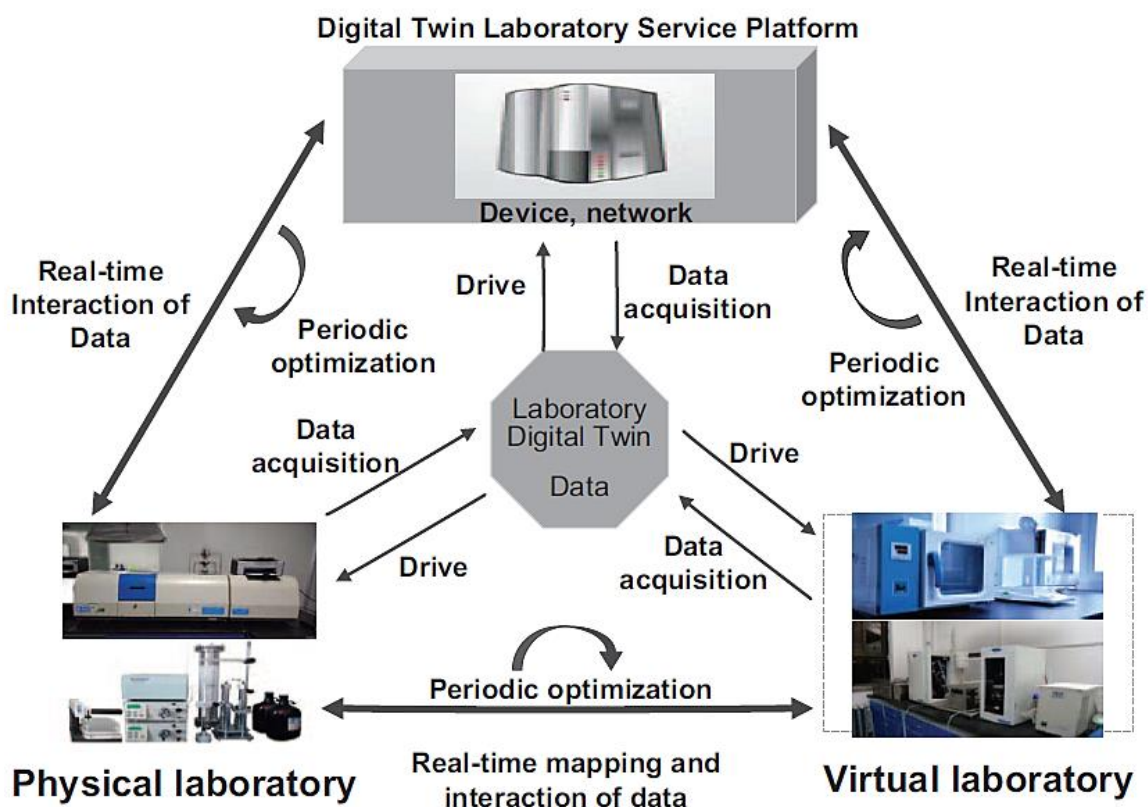
Figuur 9: DDM concept DT voor het controle centrum van een EBS [32, p. 5]

Data is de basis van DT technologie, het model is de kern van het ontwerp, en de software is het medium waarin een DT gecreëerd wordt. De eerste stap in het ontwerp is het modelleren van het gedrag van de fysieke asset. Dit omvat het maken van een betrouwbaar virtueel model dat de geometrie, fysische eigenschappen en het gedrag van de fysieke asset reproduceert. Omdat smart-grid-systemen complex zijn, is het zeer moeilijk om zo een virtueel model te maken, wat algemeen bestaat uit verschillende algebraïsche, differentiële of partiële differentiële wiskundige vergelijkingen en algoritmes [30]. Verder moet het model een voldoende nauwkeurigheid en werkingssnelheid hebben om de fysieke asset in real-time te simuleren. De implementatie van een DT voor smart-grid-systemen heeft verschillende voordelen. Deze voordelen zijn hieronder samengevat [31], [32]:

- **Verbeterde modellering en observatie:** DT's kunnen fysieke toestandsvariabelen in real-time, of sneller dan real-time bepalen. Dit maakt het mogelijk om voldoende op de fysica gebaseerd energiesysteemmodellen te genereren, die parallel lopen met het reële systeem. Deze modellen maken het mogelijk om nauwkeurige systeemanalyses uit te voeren met *controller-feedback*. Deze controller-feedback zorgt ervoor dat het reële systeem steeds optimaal werkt.
- **Verbeterde monitoring en evaluatie:** met DT's is een continue analyse en beoordeling van de systeemstatus mogelijk. Dit verbetert de bestaande mogelijkheden voor het identificeren van afwijkingen en onregelmatigheden tussen de prestaties van het fysieke systeem en het gedrag van het model (bv. mechanische spanningsbelastingen in het systeem, storingen, IT-aanvallen, modelstoringen ...). Door continue online monitoring en optimale onderhoudsschema's kan het optreden van ongeplande stroomuitval of ernstige storingen beperkt worden.
- **Verbeterde voorspelling en prognose:** DT's kunnen een gedragsvoorspelling doen die het mogelijk maakt toekomstige problemen en passende tegenmaatregelen te identificeren. Met behulp van geoptimaliseerde voorspellende controletechnieken verbetert een DT de regeltechnieken (bv. voor het starten van een elektriciteitscentrale), en de voorspelling van toekomstige operationele toestanden.
- **Verbeterde betrouwbaarheid van het systeem:** DT's kunnen helpen bij het optimaliseren van de besturing van apparaten om de dynamische systeemstabiliteit te vergroten. Operatoren zijn grotendeels verantwoordelijk voor deze besturing. Een DT maakt het mogelijk om operatoren op te leiden in een virtuele omgeving tot ze het nodige vaardigheidsniveau hebben om het echte systeem te bedienen. Het gebruik van een DT kan het menselijk leerproces versnellen en het risico op kritieke systeemtoestanden beperken.

2.4.3. Digital Twin in een labo-omgeving

In [33] is onderzoek gedaan naar de voordelen en de implementatie van een DT in een labo-omgeving, hiervoor is een *Digital Twin Laboratory Model* (DTLM) ontworpen. Dit DTLM maakt gebruik van DT-technologie om de vorm, de fysieke toestand, de werkingstoestand en karakteristieke gegevens van fysieke assets zoals laboratoriuminstrumenten uit te drukken. De auteurs refereren naar het laboratorium als een DT-labo, bestaande uit een fysiek labo, een virtueel labo, labo-DT-data en een *laboratory service platform* (LSP). Dit LSP werkt zoals de dataserver waar de data in verzameld en verwerkt wordt. Figuur 10 geeft het werkingsprincipe van een DT-labo weer.



Figuur 10: Werkingsprincipe van een DT-labo [33, p. 798]

Het fysieke labo is hetgeen dat in het werkelijk labo aanwezig is en bestaat voornamelijk uit vier onderdelen: proefopstellingen of experimentele (hardware) apparaten, sensoren en actuatoren, meetapparatuur en netwerkkapparatuur [33]. Deze onderdelen vindt men ook terug in het smart-grid-labo op de T2-campus. De proefopstellingen zijn hier de verschillende proeftafels, sensoren en actuatoren zijn aanwezig op deze tafels, de meetapparatuur in het lab zijn voornamelijk IED's, en de netwerkkapparatuur kan vergeleken worden met het SCADA-netwerk.

Het virtuele labo is de digitale uitdrukking van het fysieke labo, dit is dus het software-model van de DT. Het virtuele labo bestaat uit twee delen. Het ene deel is de digitale representatie van alle fysieke apparatuur, waaronder virtuele proefopstellingen. Het andere deel is een gedragsmodel dat de configuratie bevat van de gedragskenmerken van het labo, en deze beschrijft onder normale werkomstandigheden en kritieke werkomstandigheden, bijvoorbeeld wanneer ergens in het lab een storing optreedt. Door in het virtuele labo de werking van het fysieke labo te simuleren en real-time het labo te monitoren, kunnen nauwkeurige systeemanalyses uitgevoerd worden en wordt het model van het lab geoptimaliseerd [33].

Het LSP heeft als hoofdfunctie het analyseren en verwerken van reële en virtuele gegevens en bestaat uit een verzameling van data-gestuurde-servicesystemen. Het LSP verbindt het fysieke labo met het virtuele labo. Het fysieke labo stuurt continu real-time data naar het LSP en het LSP ontvangt ook continu simulatieresultaten gegenereerd door het virtuele labo. De servicemodule vergelijkt de resultaten uit de simulatie met de werkelijke resultaten uit het fysieke labo en stuurt vervolgens de analyseresultaten door naar beide labo's. Op basis van de resultaten optimaliseert het virtuele labo het model verder, itereert het herhaaldelijk totdat het model optimaal is. Dit is mogelijk dankzij de DT-technologie en controle-algoritmes.

Op basis van het geoptimaliseerde model uit het virtuele labo, kan de werking van het fysieke labo geoptimaliseerd worden door operatoracties te valideren en bij te sturen of betere mogelijke instellingen van labo-apparatuur in te stellen. Zo verhoogt de efficiëntie van het lab en zal de werking van het te onderzoeken systeem verbeteren [33]. In het smart-grid-labo zou dit LSP gerealiseerd kunnen worden door de host computer met de SCADA-server, die verantwoordelijk is voor de gegevensuitwisselingen in het fysieke labo, te verbinden met een DT.

Ten slotte is er nog de labo-DT-data-module, deze module bevat de data uit het fysieke labo, uit het virtuele labo, de LSP-data en de afgeleide data na een driedelige datafusie. Data uit het fysieke labo bevat de data van de labo-apparatuur, de gemeten data van de meetapparatuur en de data uit het netwerk wat de laboproeftafels met elkaar verbindt. Data uit het virtuele labo bevat modeldata, simulatiedata en data die gegenereerd wordt tijdens de machine learning, optimalisatie van de DT. De LSP-data zijn de verwerkte data van beide labo's en de afgeleide data is hetgeen wat over blijft na de data-fusie. De labo-DT-data-module biedt dus de gegevensondersteuning voor het DT-labo. Het integreert dataverwerkingsfuncties zoals het genereren, verwerken en samenvoegen van DT-data [33]. De gegevensondersteuning gebeurt bij DT's altijd door middel van software.

2.5. Digital Twin voor het smart-grid-labo

Het smart-grid-labo van de T2-campus is een educatief lab waar de gebruikers bekend raken met de verschillende onderdelen van het distributienet, en leren hoe het traditionele net de overgang maakt naar een smart grid. Deze transitie is mogelijk door de integratie van smart-grid-technieken zoals IED's en een SCADA-netwerk. De proeftafels van LN zijn speciaal ontworpen voor educatieve doeleinden.

Een DT voor het smart-grid-labo zou zoals in het DT-labo van [33] ook een virtueel labo zijn. In het virtuele labo zou dan van de apparatuur van de proeftafels digitale modellen ontworpen moeten worden, om zo de werking van een smart grid te demonstreren. Omdat de doelstellingen van het smart-grid-labo puur educatief zijn, zijn de voordelen uit [31], [32] van de implementatie van een DT niet van toepassing. Er is geen systeem dat geoptimaliseerd moet worden, de regeltechniek in het lab gebeurt voornamelijk door PLC-programmatie, deze kan manueel door de gebruikers gewijzigd worden naar wens, dus het is ook niet nuttig om deze te verbeteren.

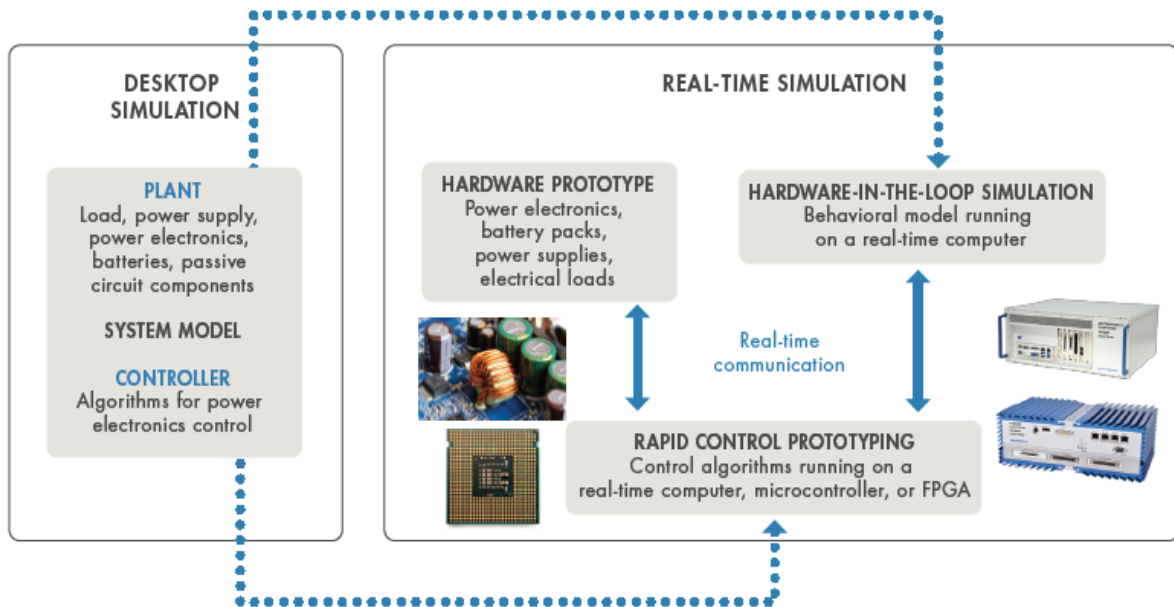
Desondanks zou het implementeren van een DT in het smart-grid-labo toch een meerwaarde kunnen betekenen, maar dan in een educatieve context. Een DT en algemeen simulaties zijn belangrijke onderwerpen in de engineering wereld. T2-campus zou aan de hand van een DT een extra educatief onderwerp kunnen toevoegen aan het lab. De virtuele replica's van de proeftafels uit het virtueel lab zijn ook een meerwaarde. Aan de hand van deze virtuele replica's zou het mogelijk zijn om op afstand, digitaal proeven uit te voeren. Hiermee zou T2 het lab kunnen gebruiken als *flipped-classroom*, waardoor studenten vanop afstand de virtuele versie van het lab kunnen gebruiken.

De meerwaarde van een werkende DT voor het smart-grid-labo is hierboven besproken. Dit is natuurlijk op basis van de veronderstelling dat het mogelijk is om een werkende DT te maken voor het lab. Uit de literatuur is echter gebleken dat het gebruiken van nauwkeurige betrouwbare DT's voor complexe energiesystemen zoals een smart grid, op korte termijn nog niet aan de orde is. De modellering van dynamische smart-grid-systemen is zeer complex. Aan de hand van het DDM-concept is het mogelijk om op lange termijn een werkende DT te creëren, als de juiste wiskundige algoritmes en complexe modellen beschikbaar zijn. Om een DT te ontwerpen is de juiste software nodig waarin de algoritmes en modellen gegenereerd kunnen worden. Veel gebruikte softwares hiervoor zijn MATLAB en Simulink, in [25], [28], [31], [34] worden deze gebruikt. Met MATLAB kan een model gedefinieerd worden met behulp van gegevens van de aangesloten fysieke componenten. Simulink kan gebruikt worden om een op fysica gebaseerd model te maken met behulp van modelleringstools. Zowel op data gebaseerde als op fysica gebaseerde modellen kunnen geoptimaliseerd worden met de data uit het fysieke systeem, deze modellen fungeren dan als DT [26].

Omdat er weinig concrete informatie en use-cases zijn van DT's voor energiesystemen is het op korte termijn niet de zinvol voor T2 om een DT te proberen ontwerpen. In Figuur 9 is in het DDM-concept een mogelijke uitbreiding aanwezig om aan HIL-simulatie te doen. Deze simulaties zijn een alternatief voor een DT en worden reeds gebruikt in energiesystemen. Het verschil tussen een DT en een HIL-simulatie, is dat een DT voornamelijk bestaat uit software en modellen terwijl bij een HIL, zoals de naam al aangeeft, echte bekabeling en elektromechanische hardware componenten bevat die rechtstreeks gekoppeld zijn met de real-time virtuele simulatie. Dus de koppeling tussen de virtuele simulatie en zijn fysieke tegenhanger verloopt bij een DT enkel via communicatie verbindingen en bij een HIL via directe bekabeling.

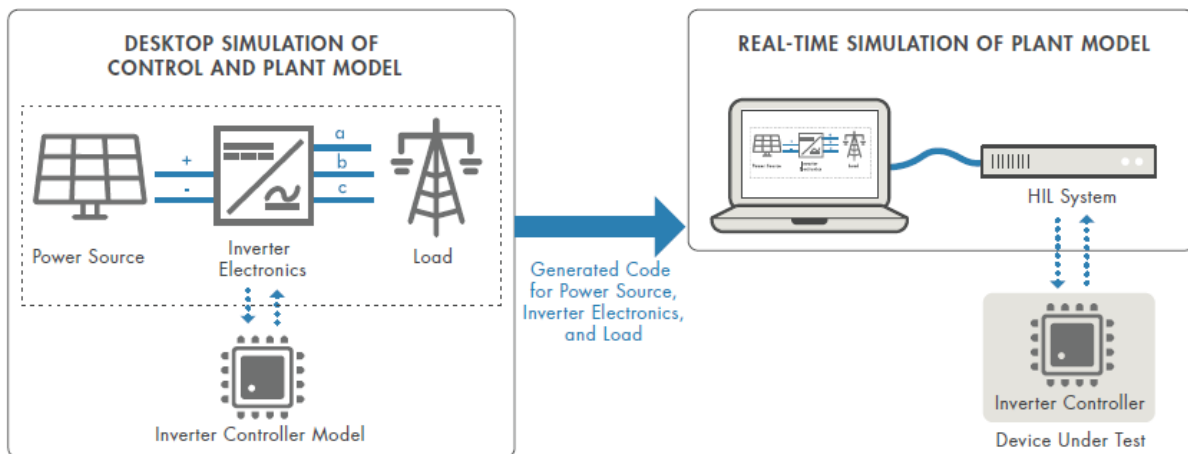
2.6. Hardware-in-the-loop-simulatie

HIL-simulatie is ook een vorm van real-time simulatie waarbij, zoals de naam suggereert, hardware componenten gecombineerd worden met real-time gesimuleerde componenten [35], [36]. Deze HIL-simulatie is een techniek die gebruikt wordt voor het in real-time testen van een bestaande component die geïntegreerd wordt in een complex geheel, en omvat de elektrische emulatie van sensoren en actuatoren in dat geheel. Deze elektrische emulaties fungeren als de interface tussen de softwaresimulatie en de te testen component [37]. HIL-systemen worden meer en meer gebruikt in het energiesysteemdomenein, zoals voor smart grids. In dit domein kan er onderscheid gemaakt worden tussen twee soorten HIL, namelijk *controller-hardware-in-the-loop* (CHIL) en *power-hardware-in-the-loop* (PHIL). Een CHIL-simulatie test enkel een controller terwijl een PHIL-simulatie zowel de controller als hardwarecomponenten test. Een algemeen HIL-systeem bestaat uit drie hoofdelementen, een real-time simulator (RTS), de *hardware-under-testing* (HUT) en simulatiesoftware. Deze RTS is een speciale computer die ervoor zorgt dat de code uit de ontworpen softwaresimulaties snel genoeg uitgevoerd kan worden, om het real-time gedrag van bijvoorbeeld (Figuur 11) een energiecentrale te simuleren op de HUT [34], [37]–[39].



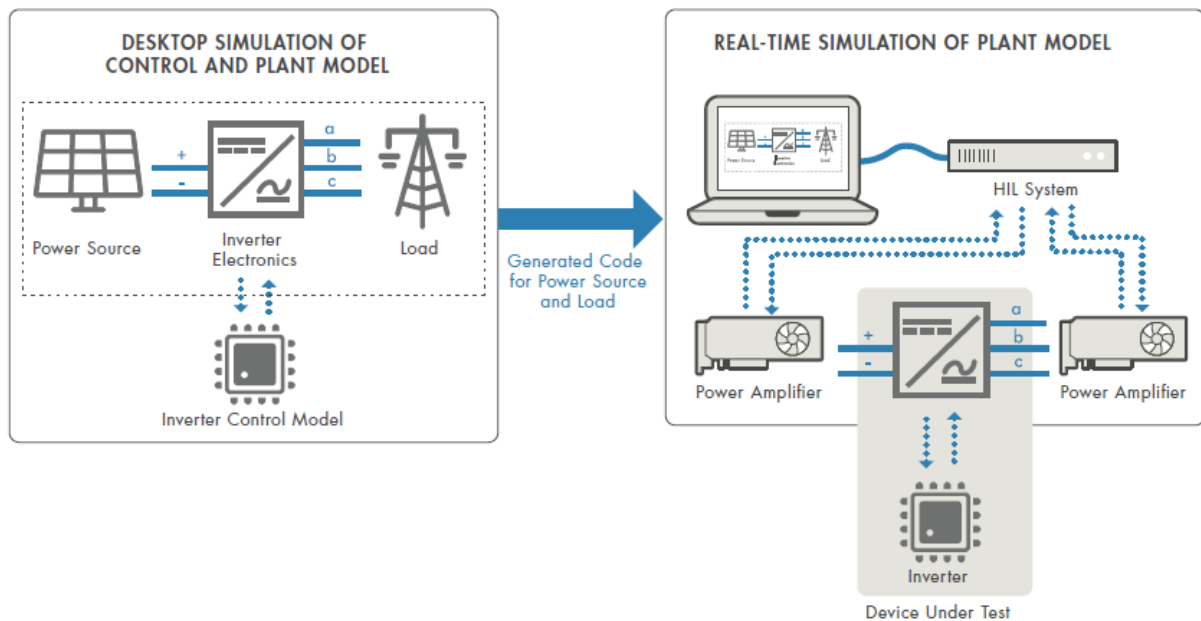
Figuur 11: Voorbeeld HIL-simulatie systeem [38, p. 3]

De RTS berekent het gedrag van het simulatiemodel in real-time en biedt *I/O-interfaces/-poorten* waarop verschillende hardware componenten zijn aangesloten de mogelijkheid om het gedrag van het gesimuleerde systeem onder dynamische omstandigheden te reproduceren. De simulator maakt het mogelijk verschillende testscenario's met een grote flexibiliteit te ontwerpen en uit te voeren. Een CHIL-simulatie (Figuur 12) omvat het testen van een apparaat, bijvoorbeeld een vermogensomzetter-controller, waarbij signalen worden uitgewisseld tussen een RTS en de HUT via de I/O-poorten.



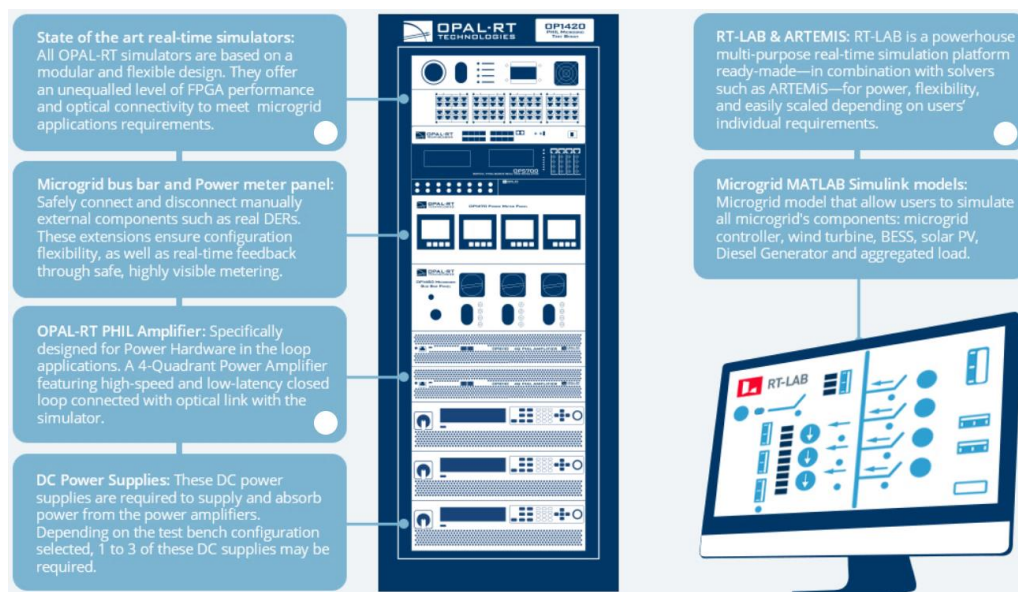
Figuur 12: CHIL-simulatie om een controller te testen [38, p. 7]

In tegenstelling tot een CHIL-simulatie waar de HUT gewoon de controller is, bevat een PHIL-simulatie een meer complexe HUT waarin zowel de controller als hardwarecomponenten in zijn opgenomen. Deze hardwarecomponenten zijn apparaten die energie verbruiken of produceren. De HUT in een PHIL-simulatie (Figuur 13) is verbonden met de RTS via vermogensversterkers, die worden aangestuurd door de simulatie.



Figuur 13: PHIL-simulatie met vermogensversterkers tussen de HUT en de RTS [38, p. 8]

Een HIL-simulatie voor het smart-grid-labo is een PHIL, met behulp van een RTS-testbank is het mogelijk om de hardware van de proeftafels te testen in diverse bedrijfsomstandigheden. Met behulp van MATLAB en Simulink modellen is het mogelijk om extreme testcondities te simuleren. Zo kan de werking van het smart grid bij verschillende complexere omstandigheden onderzocht worden. Om een PHIL-simulatie te implementeren in het lab moet T2 een RTS-testbank aankopen. Eén van de meest gebruikte testbanken is een testbank van OPAL-RT (Figuur 14) [40].



Figuur 14: OPAL-RT RTS-testbank [40]

Zoals besproken bestaat het smart-grid-labo uit het Lucas-Nülle Power Engineering Training, de proeftafels zijn zo gemaakt dat gebruikers van verschillende opleidingsniveaus gebruik kunnen maken van het lab. Dankzij een succesvolle samenwerking van LN met OPAL-RT is het mogelijk om een OPAL-RT testbank te integreren in het smart-grid-labo. Op deze manier wordt PHIL-simulatie mogelijk voor de LN-proeftafels. Dit vergroot de toepassingsmogelijkheden van het smart-grid-labo, het uitvoeren van complexe simulaties is dan vooral gericht op studenten uit het hoger onderwijs [41].

2.7. Conclusie analyse Digital Twin voor het smart-grid-labo

Het hoofddoel van de literatuurstudie was om te onderzoeken of de implementatie van een DT in het smart-grid-labo een meerwaarde is. Hieruit is gebleken dat de voordelen die een DT heeft voor smart-grid-systemen niet van toepassing zijn op het smart-grid-labo. Dit is te wijten aan een verschil in doelstellingen. De implementatie van een DT zou geen meerwaarde zijn voor de werking van het labo, enkel in een educatieve context als een *standalone* didactisch onderwerp.

Het ontwerpen van een DT voor het smart-grid-labo is op korte termijn niet mogelijk. Dit omwille van de complexiteit van smart-grid-systemen. Op dit moment zijn er geen referenties wat voor een grote onzekerheid zorgt. Het ontwikkelen van de nodige simulatie modellen en algoritmes is complex en tijdsintensief. Een alternatief is het implementeren van HIL-simulatie in het smart-grid-labo. Bij HIL zijn geen complexe modellen nodig van de hardware componenten. Door de samenwerking van LN met OPAL-RT kan het labo uitgebreid worden met de OPAL-RT RTS-module, waarvan de werking gegarandeerd is. Zowel DT's als HIL-simulaties hebben de juiste software nodig zoals MATLAB en Simulink. T2-campus heeft geen licenties voor deze software. Als de keuze gemaakt wordt om een DT te ontwerpen voor het labo of te investeren in de HIL-uitbreiding, zal T2-campus deze licenties moeten aankopen. Een tweede alternatief is pure software-simulaties.

Met behulp van gewone software-simulaties kan de werking van een smart grid ook gedemonstreerd worden. Hiervoor kan zowel MATLAB als Simulink gebruikt worden maar deze licenties zijn duur. Gratis *opensource software* kan een alternatief bieden maar is minder toegankelijk en gebruiksvriendelijk. T2-campus kan met de simulaties het lab beschikbaar stellen als flipped-classroom aan potentiële klanten, zoals scholen of bedrijven. Maar met deze simulaties gaat het doel van het smart-grid-labo verloren, namelijk op een didactische *hands-on* interactieve manier studenten de werking van een smart grid leren. De combinatie van het fysieke lab en simulaties kan wel een meerwaarde zijn voor T2. Door de twee te combineren kan er flexibeler de werking van smart grids onderzocht worden. Zo kan bijvoorbeeld de werking van onderdelen uit het smart grid apart onderzocht worden in een virtuele simulatieomgeving, terwijl de volledige werking van het lokaal smart grid onderzocht wordt, fysiek in het smart-grid-labo. Verder is het in een simulatieomgeving ook mogelijk om virtueel diepgaandere analyses uit te voeren die het fysieke lab niet toelaat.

Het is aan T2-campus om te beslissen of ze in de toekomst tijd en geld in DT's, HIL-simulaties of software-simulaties willen investeren. Of dat ze enkel aan de hand van de smart-grid-opstelling de werking van het smart grid willen aantonen in het lab.

3. Materiaal en methode

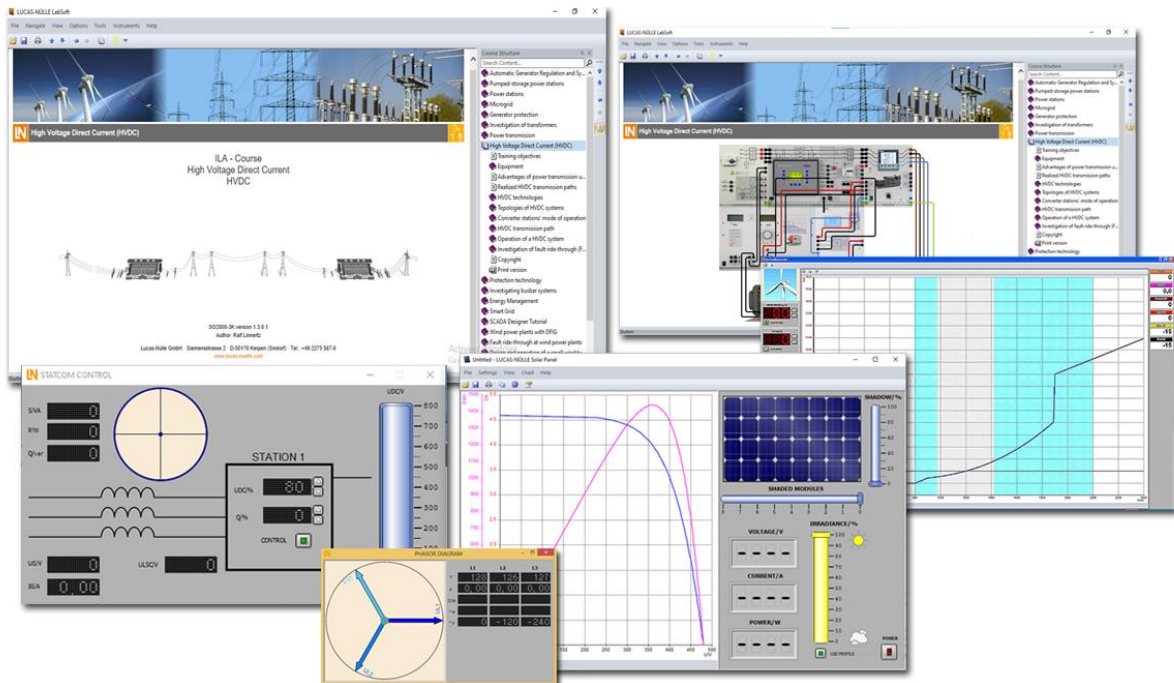
3.1. Materiaal van het smart-grid-labo

3.1.1. De labo-infrastructuur

Het smart-grid-labo van de T2-campus bestaat uit het LN-opleidingssysteem voor elektrotechniek. De elektrotechniek in de smart grid context omvat de gebieden opwekking, transmissie, distributie en het gebruik van elektrische energie, evenals veiligheidsmaatregelen die op deze gebieden worden gebruikt. Het smart-grid-labo bestaat uit tien verschillende proeftafels met apparatuur van LN die elk een deel binnen deze gebieden van elektrotechniek voorstellen. Door het combineren van deze proeftafels is het mogelijk om een lokaal smart grid op te bouwen. De tien proeftafels staan hieronder beknopt beschreven, voor een gedetailleerde beschrijving wordt verwezen naar Bijlage A:

- **Smart Grid Control Center (SGCC):** deze proeftafel vormt de kern van het smart grid en bestaat uit een dubbel *busbar*-systeem. Vanuit het controlecentrum worden via SCADA-software de op de busbars aangesloten generatoren en verbruikers gemonitord en aangestuurd.
- **Energiecentrale:** deze proeftafel laat toe verschillende soorten energiecentrales te simuleren die gebruik maken van een synchrone generator.
- **Waterkrachtcentrale:** deze proeftafel is identiek aan de proeftafel van de energiecentrale. Het is hiermee mogelijk de werking van een waterkrachtcentrale met energieopslag te simuleren
- **Windturbinepark:** deze proeftafel is laat toe om de werking van moderne windturbines te onderzoeken, deze maken gebruik van een dubbel gevoed inductiegenerator.
- **Zonnepark:** deze proeftafel kan door gebruik van een zonnepaneel-emulator de werking van een PV-installatie nabootsen onder variabele instraling en schaduwvorming.
- **Batterijopslag:** deze proeftafel hangt samen met het zonnepark. De tafel bevat een batterij die de opgewekte zonne-energie kan opslaan en op het gepaste moment weer kan vrijgeven.
- **Hoogspanning DC (HVDC):** deze proeftafel maakt de studie van de transitie van elektrische energie over een HVDC-verbinding tussen twee HVDC-omvormerstations mogelijk.
- **Hoogspanning AC (HVAC):** deze proeftafel zorgt voor de transmissie van elektrische energie over conventionele hoogspanningslijnen en -kabels.
- **Transformatoren:** deze proeftafel bevat een scheidingstransformator, die zorgt voor de omzetting van elektrische energie tussen twee verschillende spanningsniveaus. Deze transformator is op verschillende proeftafels terug te vinden.
- **Verbruikers (R, L, C):** deze proeftafel bevat verschillende soorten verbruikers die naar wens gecombineerd kunnen worden.

Om te leren werken met de verschillende proeftafels zijn er de standaard LN-cursussen met verschillende proeven beschikbaar. De LN-labo-infrastructuur van het smart-grid-labo is ondersteund door het computer-gebaseerd leerplatform LabSoft. LabSoft biedt de mogelijkheid om interactief de cursussen en de bijhorende proeven te doorlopen en gebruik te maken van virtuele hulpmiddelen/instrumenten bovenop de fysieke labo-instrumenten. Elke proeftafel is uitgerust met een computer voorzien van LabSoft. Figuur 15 toont enkele afbeeldingen van LabSoft en zijn virtuele instrumenten.

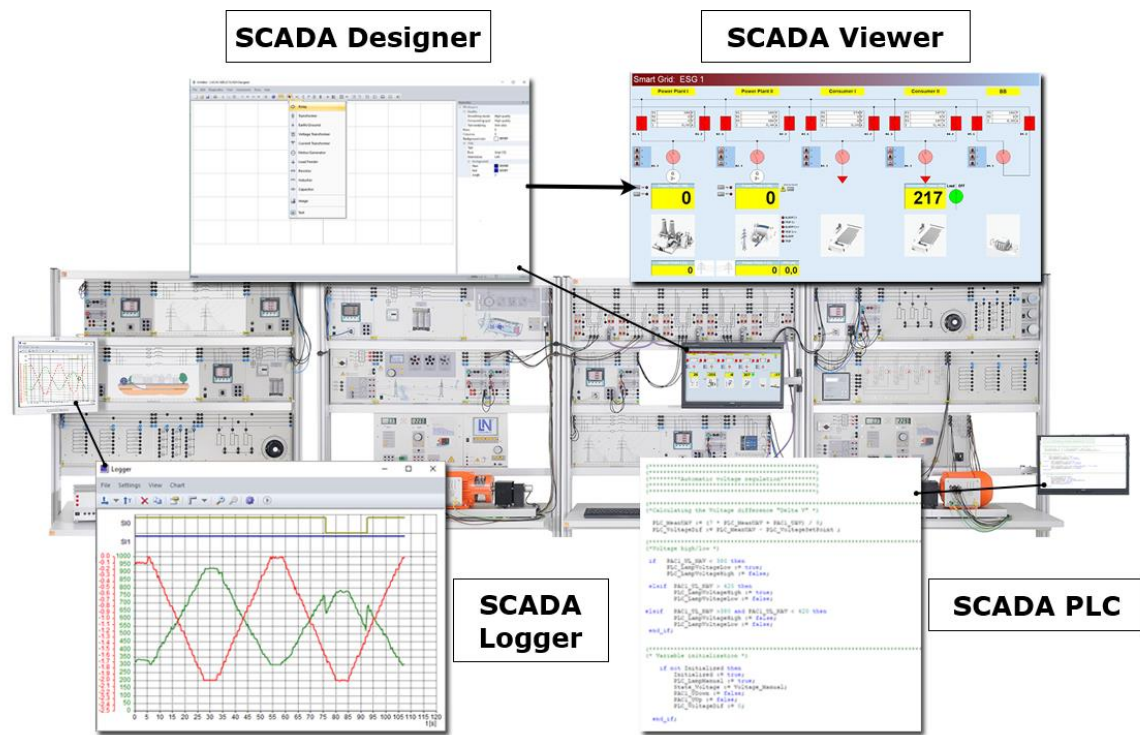


Figuur 15: Voorbeelden LabSoft en zijn virtuele instrumenten

Naast LabSoft wordt de LN-labo-infrastructuur nog ondersteund door de Power-LAB-software. Deze software is de basis van de SCADA en laat toe de componenten van de labo-infrastructuur te regelen en te monitoren. Via de software kunnen meetwaarden en de werkingsmodi van het systeem in real-time worden weergegeven op het computerscherm. De Power-LAB-software voor de SCADA bestaat uit de volgende onderdelen [42]:

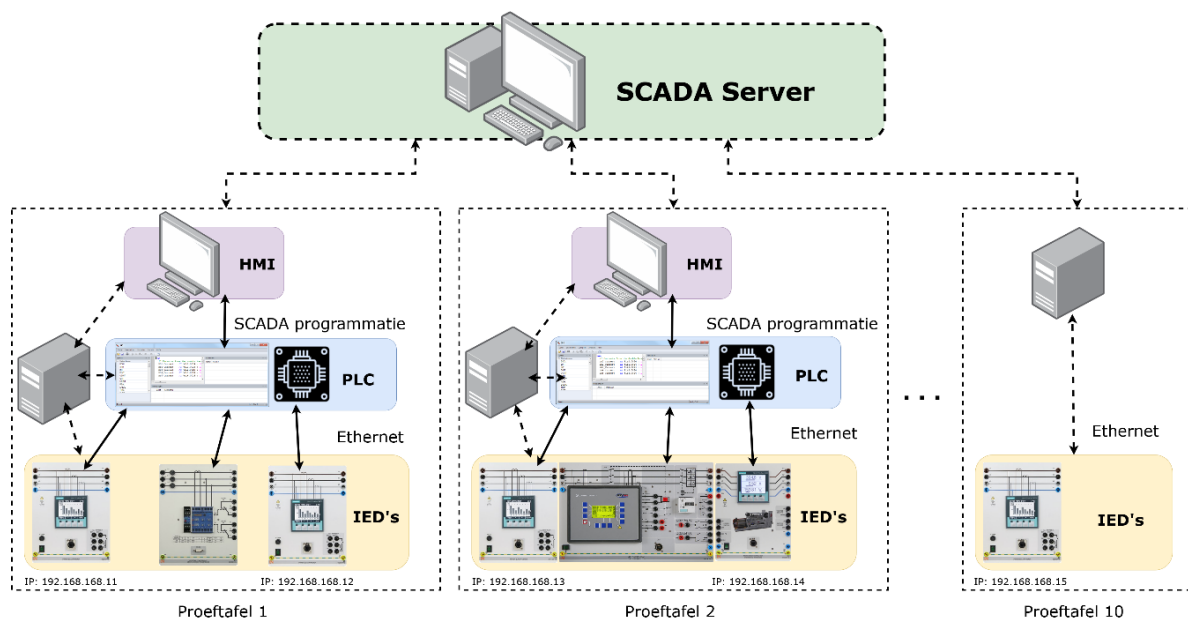
- **SCADA-PLC:** dit is een geïntegreerde software-PLC, programmeerbaar in overeenstemming met IEC 61131.
- **SCADA-Designer:** met deze *designer* is het mogelijk om een symbolische *lay-out* van een proces of proef te ontwerpen. Deze *lay-out* is een *userinterface* waar variabelen of meetwaardes van IED's aan gekoppeld worden. Via de designer kunnen ook de gedeclareerde variabelen in het PLC-programma aan de *lay-out* gekoppeld worden. De uiteindelijke *lay-out* is een *Human Machine Interface* (HMI).
- **SCADA-Viewer:** in deze *viewer* is het mogelijk om ontworpen HMI's te openen en te gebruiken.
- **SCADA-Logger:** met de logger kunnen grafieken van meetwaarden doorheen de tijd geplotted worden. Deze grafieken kunnen verwerkt en geëxporteerd worden.

Met behulp van de Power-LAB-software is het mogelijk om vanuit de HMI van het SGCC het complete lokale smart grid te monitoren en te regelen. Figuur 16 geeft een overzicht van vier proeftafels met de ondersteunende Power-LAB-software van LN.



Figuur 16: Overzicht Power-LAB-software

Het smart-grid-labo heeft een centrale server, elke computer in het lab is via ethernet verbonden met deze server. Er is dus een lokaal (offline) netwerk tussen de computers en de server. Figuur 17 geeft de SCADA-netwerktopologie van het lab weer. De verschillende proeftafels hebben IED's zoals slimme meters en relais, deze zijn via ethernet ook verbonden met het lokaal netwerk. Iedere IED heeft een eigen IP-adres, aan de hand van dit IP-adres kan onderscheid gemaakt worden tussen de verschillende IED's bij het gebruiken van een HMI in de SCADA-viewer. Door dit SCADA-netwerk is alles in het lab met elkaar verbonden. De SCADA-PLC en de HMI hebben hierdoor toegang tot alle waarden en signalen die actief zijn in het smart-grid-labo.



Figuur 17: SCADA-netwerktopologie smart-grid-labo

3.1.2. Inventaris

Door de omvangrijke en complexe opbouw van het smart-grid-labo is het moeilijk om de mogelijkheden van het lab overzichtelijk weer te geven. Om dit te verhelpen is een inventaris opgesteld in Excel. Deze inventaris bevat:

- Een algemeen overzicht van alle proeftafels en bijhorende LN-cursussen (Figuur 18).
- Per proeftafel een omschrijving, een componentenlijst en een visuele weergave van de tafel (Figuur 19).
- Een overzicht van de LN-cursussen waarin per cursus alle proeven en deelproeven beknopt beschreven staan. Elke proef bestaat uit één of meerdere deelproeven. Voor elke deelproef zijn de nodige componenten opgelijst. Verder is er per deelproef ook nog beschreven of er een SCADA-HMI nodig is voor het uitvoeren van de proef (Figuur 20).
- Een overzicht van de bestaande SCADA-HMI's (Figuur 21).
- Een overzicht van de virtuele instrumenten uit LabSoft gebruikt in bepaalde deelproeven. Deze virtuele instrumenten zijn meet- en regelinstrumenten die bepaalde componenten, die via USB verbonden zijn met de bijhorende computer, kunnen regelen of uitlezen (Figuur 22).
- Een overzichtslijst van alle componenten van de totale labo-infrastructuur. Per component is het artikel nummer, de omschrijving en het aantal beschreven. Onderaan de componentenlijst staan de verschillende componenten met hun eigen IP-adres die via een ethernetverbinding met het lokaal netwerk verbonden zijn (Figuur 23).

De inventaris geeft aan de hand van de proefomschrijvingen en de SCADA-HMI's de mogelijkheden van het lab overzichtelijk weer. Voor T2-campus vormt deze inventaris een uitgebreide catalogus. Deze catalogus kan T2 beschikbaar stellen aan potentieel geïnteresseerde bedrijven of onderwijsinstellingen, waardoor zij een aangepaste cursus kunnen samenstellen die voldoet aan de gewenste eisen. Verder is de inventaris ook de basis van het ontwerp van de smart-grid-opstelling. Hieronder staan enkele *screenshots* uit de inventaris-Excel-file.

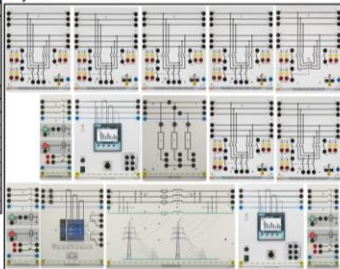
Overzicht Smart Grid Labo T2		LN Cursussen (proeven)														
Proeftafels	Smart Grid Control Center	EUG	EUC	EWG1F	EGP	EDC1	EPD	EUT	EMG	EUG4	EUL	EPH3	ELP	EUG3	ESG	EWG1
	Energiecentrale															
	Waterkracht centrale (PHS)															
	Wind turbine park															
	Hoogspanning DC															
	Hoogspanning AC															
	Transformatoren															
	Verbruikers (R, L, C)															
	Zonnepark															
	Batterij opslag															
Overzicht SCADA							EPD		EMG	EUG4	EUL	EPH3		EUG3	ESG	

EUG	Automatic Generator Regulation and Synchronisation to the Grid
EUC	Energy Management
EWG1F	Faultride-through at wind power plants
EGP	Generator protection
EDC1	High Voltage Direct Current HVDC
EPD	Investigating busbar systems
EUT	Investigation of transformers
EMG	Microgrid
EUG4	Power stations
EUL	Power transmission
EPH3	Professional photovoltaic: Modern photovoltaic systems in grid-coupled operation
ELP	Protective systems for high-voltage transmission lines
EUG3	Pumped-storage power stations
ESG	Smart Grid
EWG1	Wind power plants with DFIG

Figuur 18: Inventaris screenshot van het algemeen overzicht

Proeftafels		
Proeftafel:	Smart Grid Control Center	
Omschrijving:	Deze apparatuur vormt de kern van een 'smart grid' in een laboratorium voor energieopwekking. Naast de opwekking, transmissie en distributie van energie registreert de SCADA-software alle relevante waarden en zorgt voor de nodige schakelhandelingen. Dit kan handmatig gebeuren of automatisch door middel van een softwarematig PLC-systeem.	
Onderdelen		
Artikel nummer	Omschrijving	Aantal
CO3301-3Z	Regelbare 3-fasige voeding, 0-450V/2A	1
CO3301-5R	Dubbele busbar unit, 3-fasig, Inkomende/uitgaande voeding	6
CO3301-5S	Dubbele busbar unit, 3-fasig, koppelpaneel	1
CO3301-3A	Transmissielijn model 150km/300m	1
CO3301-4J	Tijd-overstroom relais	1
CO3301-3H	Ohmse weerstand 3x 560 Ω	1
CO3301-5P	Vermogensschakelaar-module	3
CO5127-1S	3-fasige Power quality meter (sinisme meter), display en lange termijn geheugen	2

Layout





Figuur 19: Inventaris screenshot SGCC proeftafel

LN Cursus:		Investigating busbar systems	EPD
Omschrijving:	In deze cursus wordt de werking van busbar-systemen onderzocht. De gebruiker leert de volgende delen uit de cursus: Inzicht krijgen in het basisonderwerp van schakelapparatuur; Het verschil begrijpen tussen een schelidingschakelaar (isolator) en een vermogenschakelaar (circuit breaker); Leert over de functies van dubbele stroomrails (busbars); Analyseren van stroomverdeling in schakelinstallaties; Oefenen van juiste schakelvolgordes; Het veilig schakelen van uitgaande voedingen voor mens en apparatuur; Het veilig schakelen van stroomrails voor mens en materieel; Leren na te denken alvorens te handelen (verkeerd schakelen kan zeer kostbaar blijken).		
Inhoud			
Aansturing van enkele/dubbele stroomrails (busbars)	Enkele stroomrail werking met één ingaande voeding (feeder) Enkele stroomrail werking met twee ingaande voedingen (feeders) Dubbele stroomrail werking met twee ingaande voedingen (feeders) Stroomrailwisseling zonder onderbreking		
Aansturing van enkele/dubbele stroomrails (busbars)			
Deelproef	Inhoud proef	SCADA nodig?	
Enkele stroomrail werking met één ingaande voeding (feeder)	In dit experiment voeren we voor elk veld afzonderlijk schakelhandelingen uit. Na elke schakelhandeling voor een veld moet de schakelpositie geverifieerd worden. De schakelhandelingen kunnen manueel of via SCADA worden uitgevoerd. Bij dit experiment is er maar één enkele voeding en wordt er maar één stroomrail gebruikt.	Ja EPD	
Enkele stroomrail werking met twee ingaande voedingen (feeders)	In dit experiment voeren we voor elk veld afzonderlijk schakelhandelingen uit. Na elke schakelhandeling voor een veld moet de schakelpositie geverifieerd worden. De schakelhandelingen kunnen manueel of via SCADA worden uitgevoerd. Bij dit experiment zijn er twee voedingen en wordt er maar één stroomrail gebruikt.	Ja EPD	
Dubbele stroomrail werking met twee ingaande voedingen (feeders)	In dit experiment voeren we voor elk veld afzonderlijk schakelhandelingen uit. Na elke schakelhandeling voor een veld moet de schakelpositie geverifieerd worden. De schakelhandelingen kunnen manueel of via SCADA worden uitgevoerd. Bij dit experiment zijn er twee voedingen en worden beide stroomrails gebruikt. De stroom van de belasting is gelijk verdeeld over beide stroomrails.	Ja EPD	
Stroomrailwisseling zonder onderbreking	In dit experiment voeren we voor elk veld afzonderlijk schakelhandelingen uit. Na elke schakelhandeling voor een veld moet de schakelpositie geverifieerd worden. De schakelhandelingen kunnen manueel of via SCADA worden uitgevoerd. Bij dit experiment zijn er twee voedingen en worden beide stroomrails gebruikt. De stroom van de belasting is gelijk verdeeld over beide stroomrails. Tijdens de schakelhandelingen gebeurt er een wisseling van stroomrails zonder onderbreking.	Ja EPD	
Nodige componenten			
Artikel nummer	Omschrijving	Aantal	
CO3301-3Z	Regelbare 3-fasige voeding, 0-450V/2A	1	
CO3301-5R	Dubbele busbar unit, 3-fasig, Inkomende/uitgaande voeding	4	
CO3301-5S	Dubbele busbar unit, 3-fasig, koppelpaneel	1	
CO3301-3H	Ohmse weerstand 3x 560 Ω	1	
CO5127-1S	3-fasige Power quality meter (sinisme meter), display en lange termijn geheugen	1	
CO3301-3F	Variable ohmse weerstand, 3-fasig, 1kW	1	

Figuur 20: Inventaris screenshot "Investigating busbar systems"-cursus met bijhorende proef en deelproeven

SCADA HMIs

SCADA:

EPD

Omschrijving:

Basic SCADA-dashboard, enkel het schakelen en het uitlezen van de busbarrelais en één enkele PQ-meter.

EPD

The dashboard displays five fields, each with a status indicator, a circuit diagram, and a data table.

Field 1 In1

STATUS OK

BB1

BB2

q1.1, q1.2, q1.3

q1.1 OFF ON, q1.2 OFF ON, q1.3 OFF ON

S-In1/VA 0

BB Power Quality Meter

Field 2 In2

STATUS OK

q2.1, q2.2, q2.3

q2.1 OFF ON, q2.2 OFF ON, q2.3 OFF ON

S-In2/VA 0

Field 3 Out1

STATUS OK

q3.1, q3.2, q3.3

q3.1 OFF ON, q3.2 OFF ON, q3.3 OFF ON

S-Out1/VA 0

Field 4 Out2

STATUS OK

q4.1, q4.2, q4.3

q4.1 OFF ON, q4.2 OFF ON, q4.3 OFF ON

S-Out2/VA 0

Field 5 Bus Coupler

STATUS OK

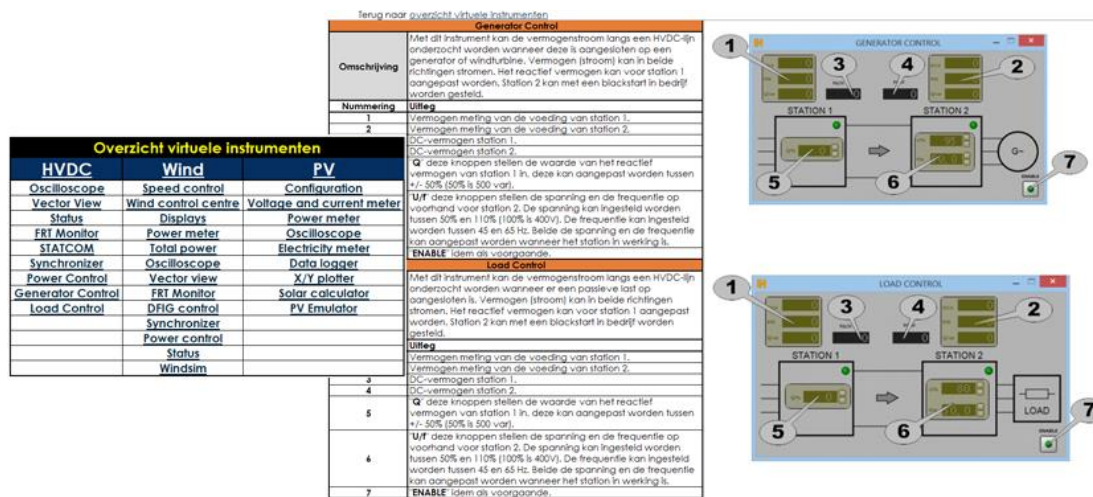
q5.1, q5.2, q5.3

q5.1 OFF ON, q5.2 OFF ON, q5.3 OFF ON

S-BC/VA 0

The dashboard also includes a power quality meter for BB and two images of industrial equipment.

Figuur 21: Inventaris screenshot van de SCADA-HMI van een proef uit de "Investigating busbar systems"-cursus



Figuur 22: Inventaris screenshot virtuele instrumenten uit LabSoft

Componenten			
Artikel nummer	Omschrijving	Aantal	Opmerking
CO3208-1L	Lampenbord 230V	1	
CO3208-1N	3-fasige industriële fotovoltaïsche omvormer (netgekoppelde inverter)	1	Aansluiting RS485
CO3208-1P	Zonnepaneel emulator, 1,5kW, 500V	1	Aansluiting USB Wordt enkel geregeld mbv een virtueel instrument
CO3208-2L	Autonome batterijopslag	1	Aansluiting Ethernet
CO3208-3A	Controle-eenheid voor windturbine, dubbel gevoede asynchrone generator	1	Aansluiting USB Wordt bestuurd via WindSim en de virtuele instrumenten niet via de SCADA
CO3208-3B	3-fasige scheidingstransformator, 1kW voor windkrachtcentrales	1	
CO3208-3C	Dynamische netstoringssimulator	1	Handmatig in te stellen en te starten, gaat niet via de SCADA
CO3212-1P	Motorbeveiligingsschakelaar, 3 polig, 1,8-2,5A	3	
CO3212-2D	Ster-driehoek schakelaar	1	
CO3212-5U	3-fasige stroomvoorziening voor elektrische machines	6	
CO3212-6V	Synchronisatie-eenheid	2	
CO3301-3AA	Transmissielijn model 150km/300km	2	
CO3301-3CA	Kabel transmissielijnmodel 12,5km/37,5km	1	
CO3301-3D	Inductieve belasting, 3-fasig, 1kW	5	
CO3301-3E	Capacitieve belasting, 3-fasig, 1kW	3	
CO3301-3F	Variabele ohmse weerstand, 3-fasig, 1kW	7	
CO3301-3H	Ohmse weerstand 3x 560 Ω	1	
CO3301-3M	Transformator station 380V/110V	1	
CO3301-3N	Scheidingstransformator, 3-fasig, 1kW	1	
CO3301-3P	3-fasige variabele auto-transformator met motoraandrijving	2	Onrechtstreeks gestuurd via de gemeten waarden (PQ-meter)
CO3301-3Z	Regelbare 3-fasige voeding, 0-450V/2A	4	
CO3301-4J	Tijd-overstroom relais	1	Aansluiting RS485 Wanneer relais tript kan dit worden uitgelezen in de SCADA
CO3301-4N	Tijd over-/onderspanningsrelais	1	Aansluiting RS485 Wanneer relais tript kan dit worden uitgelezen in de SCADA
CO3301-4X	Aardfoutcompensatie-eenheid (aardlekschakelaar)	1	
CO3301-5D	Reactief vermogen controller	1	Handmatig in te stellen, kan niet bestuurd worden via de SCADA
CO3301-5E	Schakelbare condensatorbatterij	1	Onrechtstreeks gestuurd via de gemeten waarden (PQ-meter)
CO3301-5G	Excitatie spanningsregelaar met de-excitatie (ontkoppeling van net bij fout)	2	Aanstuurbaar via multifunctioneel relais of HMI
CO3301-5L	HMI (Human Machine Interface) voor generatoren	2	Aansluiting Ethernet Uitlezen en aansturen van excitorator
IP-adressen			
Tafel	Component	IP-adres	
Smart Grid Control Center	881 Dubbele busbar feeder CO3301-5R	192.168.168.101	
Smart Grid Control Center	882 Dubbele busbar feeder CO3301-5R	192.168.168.102	
Smart Grid Control Center	883 Dubbele busbar feeder CO3301-5R	192.168.168.103	
Smart Grid Control Center	884 Dubbele busbar feeder CO3301-5R	192.168.168.104	
Smart Grid Control Center	885 Dubbele busbar koppelpaneel CO3301-5S	192.168.168.105	
Smart Grid Control Center	886 Dubbele busbar feeder CO3301-5R	192.168.168.106	
Smart Grid Control Center	887 Dubbele busbar feeder CO3301-5R	192.168.168.107	
Smart Grid Control Center	3-fasige Power Quality Meter CO5127-1S	192.168.168.11	
Smart Grid Control Center	3-fasige Power Quality Meter CO5127-1S	192.168.168.12	
Energiecentrale	3-fasige Power Quality Meter CO5127-1S	192.168.168.51	
Energiecentrale	HMI voor generatoren CO3301-5L	192.168.168.52	
Waterkracht centrale (PH)	3-fasige Power Quality Meter CO5127-1S	192.168.168.93	
Waterkracht centrale (PH)	HMI voor generatoren CO3301-5L	192.168.168.92	
Wind turbine park	3-fasige Power Quality Meter CO5127-1S	192.168.168.41	
Hoogspanning DC	3-fasige Power Quality Meter CO5127-1S	192.168.168.81	
Hoogspanning AC	3-fasige Power Quality Meter CO5127-1S	192.168.168.61	
Hoogspanning AC	3-fasige Power Quality Meter CO5127-1S	192.168.168.62	
Hoogspanning AC	3-fasige Power Quality Meter CO5127-1S	192.168.168.64	
Transformatoren	3-fasige Power Quality Meter CO5127-1S	192.168.168.71	
Transformatoren	3-fasige Power Quality Meter CO5127-1S	192.168.168.72	
Verbruikers (R, L, C)	3-fasige Power Quality Meter CO5127-1S	192.168.168.21	
Verbruikers (R, L, C)	3-fasige Power Quality Meter CO5127-1S	192.168.168.63	
Zonnepark	3-fasige Power Quality Meter CO5127-1S	192.168.168.31	
Batterij opslag	888 Dubbele busbar feeder CO3301-5R	192.168.168.108	
Batterij opslag	889 Dubbele busbar feeder CO3301-5R	192.168.168.109	
Batterij opslag	8810 Dubbele busbar feeder CO3301-5R	192.168.168.110	
Batterij opslag	8811 Dubbele busbar feeder CO3301-5R	192.168.168.111	
Batterij opslag	Batterij opslag	192.168.168.91	

Figuur 23: Inventaris screenshot van een deel van de componentenlijst en de IP-adressen

3.2. Ontwerp van de smart-grid-opstelling

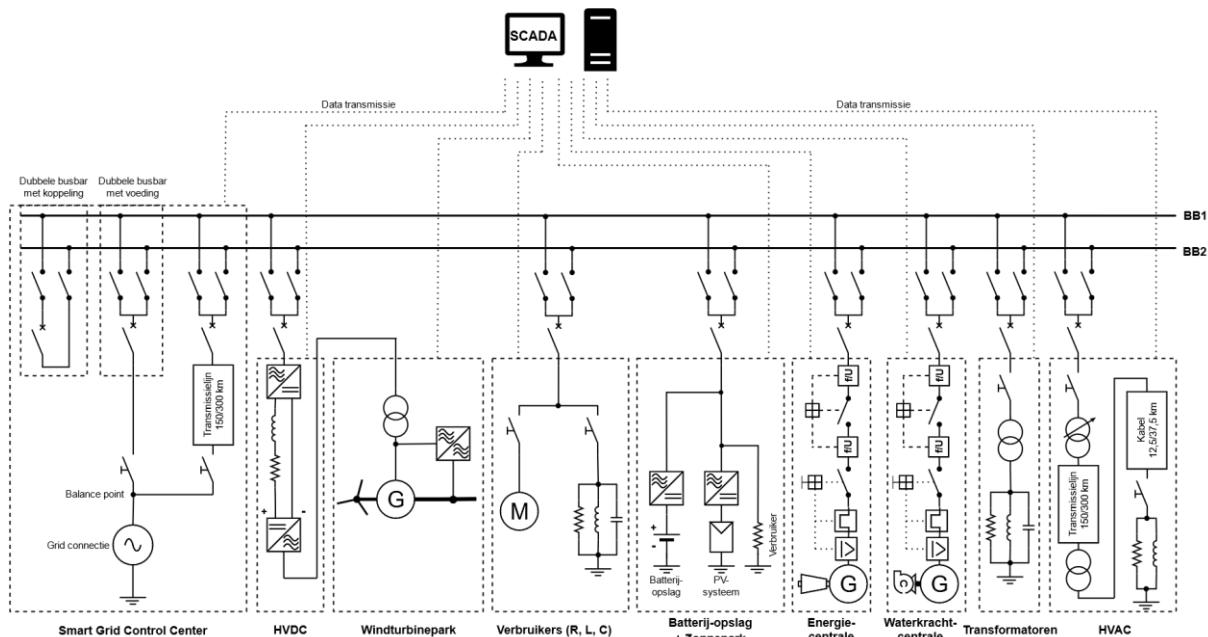
3.2.1. Ontwerpeisen

De eisen waaraan de smart-grid-opstelling moet voldoen zijn:

1. De opstelling moet de infrastructuur van het volledige smart-grid-labo integreren.
2. Het ontwerp moet de belangrijkste aspecten van de werking van een smart grid tonen. Zo kunnen de gebruikers duidelijk de verschillende onderdelen van het smart grid herkennen en de impact op het elektriciteitsnet onderzoeken. Hiervoor werden 2 scenario's gedefinieerd. Het eerste scenario gaat over de balancing van het net. Het tweede scenario behandelt meer gespecialiseerde aspecten zoals spanningsregelingen en de verschillende beveiligingen die aanwezig zijn. Deze twee scenario's worden in sectie 3.3 nader toegelicht.
3. Lesgevers van T2-campus moeten de smart-grid-opstelling snel zelfstandig kunnen opbouwen, operationeel krijgen en vermelde scenario's demonstreren. Hiertoe moet een beknopte handleiding gemaakt worden. Aan de hand van deze handleiding en de inventaris moet het mogelijk zijn om de scenario's aan te passen zodat ze aan uiteenlopende opleidingseisen voldoen. Zo kan T2-campus het smart-grid-labo optimaal benutten en ter beschikking stellen aan studenten, geschoolde arbeiders, technici of ingenieurs.

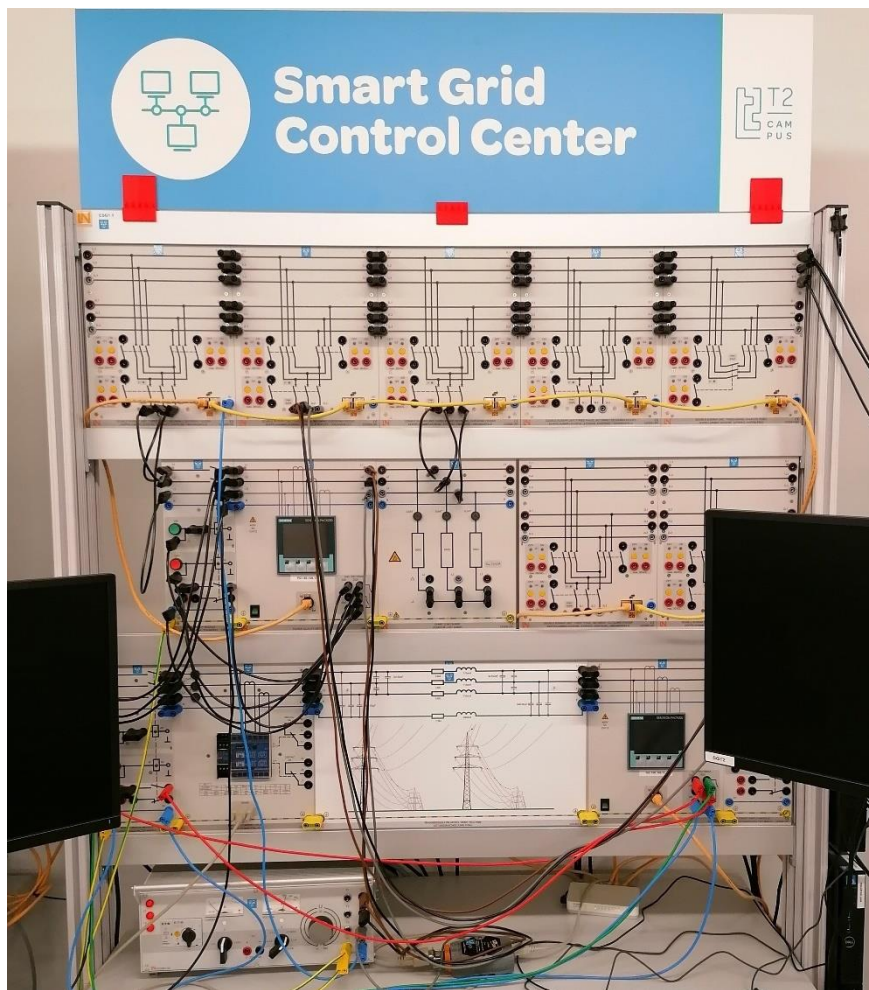
3.2.2. Benodigde labo-infrastructuur

Zoals reeds vermeld bestaat het smart-grid-labo uit tien verschillende proeftafels met apparatuur van LN. Hieronder worden de apparatuur en de configuraties van de proeftafels besproken. Het principeschema is weergegeven in Figuur 24. De verschillende proeftafels worden elektrisch met elkaar verbonden via het dubbel busbar-systeem, via het SCADA-netwerk wordt informatie uitgewisseld tussen de verschillende proeftafels.



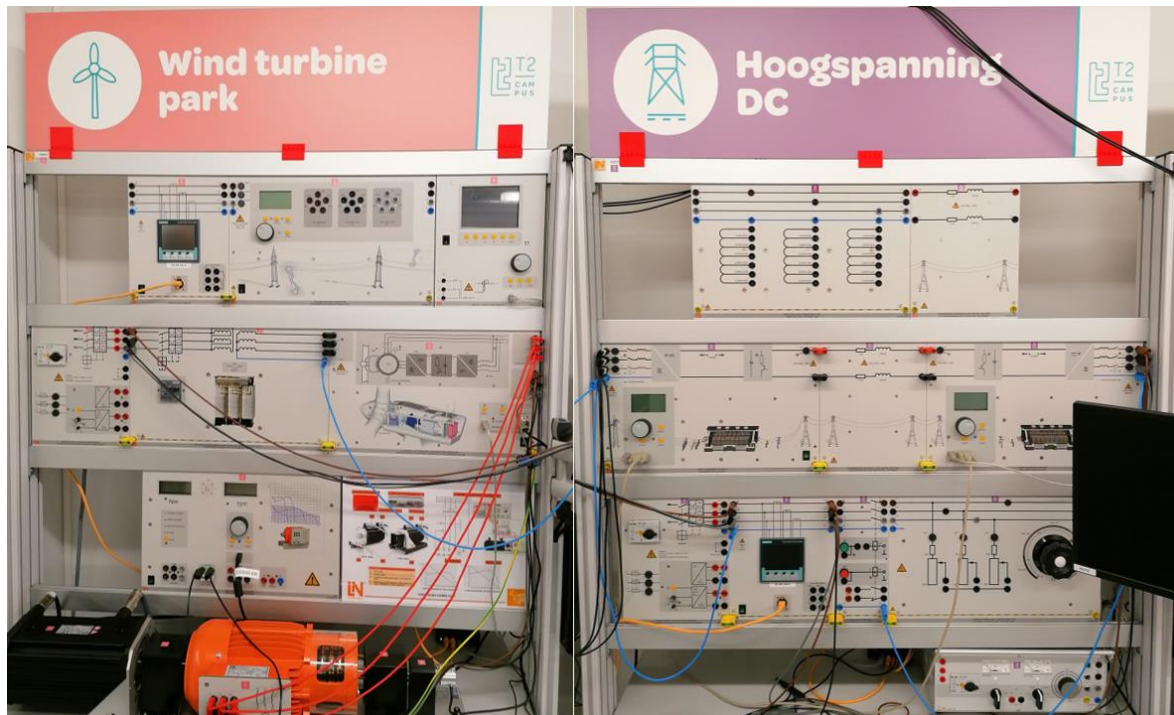
Figuur 24: Principeschema smart-grid-opstelling

In het prinsipschema zien we dat in het SGCC (Figuur 25) de koppeling met het elektriciteitsnet vervat zit. Vanuit deze plek vertrekt het dubbel-busbar systeem. De connectie van de regelbare voeding (die hier het elektriciteitsnet voorstelt) met de busbars noemen we het *balance point* (BP). De energie-uitwisseling via het BP wordt op elk moment gemonitord door een IED waarvan de data verstuurd worden over de SCADA-server. Deze waarden kunnen gemakkelijk afgelezen worden op de SCADA-HMI van het controlecentrum. Verder is er de mogelijkheid om de BP te verschuiven over een transmissielijnmodel van 150 of 300 km lang. In 0 staat een uitgebreide uitleg over de componenten van de labo-infrastructuur. Een belangrijke doelstelling van de uitbating van een smart grid is de frequentiestabiliteit van het elektriciteitsnet verzekeren. Via de SCADA wordt alles slim geregeld zodat enerzijds de productie van elektriciteit afgestemd is op de vraag bij de eindverbruikers, en anderzijds dat over het BP enkel de gecontracteerde hoeveelheden energie uitgewisseld worden samen met de primaire reserve energie.



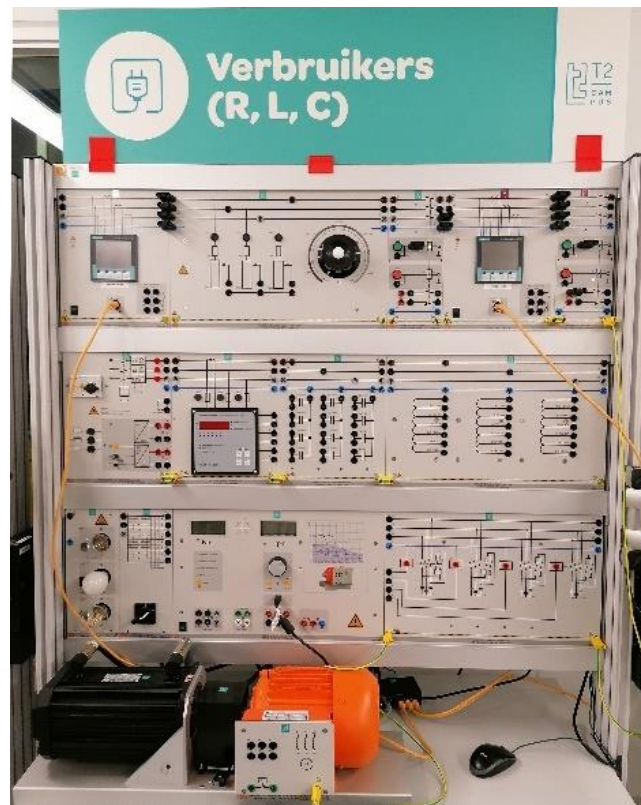
Figuur 25: SGCC-proeftafel

Het windturbinepark is over een HVDC-transmissielijn verbonden met het busbar-systeem. Deze HVDC-verbinding bevat twee HVDC-omvormerstations die kunnen werken als een STATCOM-module (statische synchrone compensator). Een STATCOM-module is een regelmodule die continu variabel reactief vermogen kan leveren of opnemen als compensatie van spanningsschommelingen in het elektriciteitsnet, waardoor de spanningsstabiliteit van het net ondersteund wordt. Het windturbinepark zelf werkt als generator die vermogen levert aan het net. Figuur 26 geeft de proeftafels van het windturbinepark en de HVDC weer.



Figuur 26: Windturbinepark en HVDC-proeftafels

De volgende proeftafel die aan het busbar-systeem hangt is deze van de verbruikers (Figuur 27). Verbruikers nemen vermogen af van het net. De proeftafel bevat statische verbruikers die voorgesteld worden door een variabele ohmse belasting (weerstand), een inductieve belasting (spoelen) en een capacitieve belasting (condensatoren). Naast deze statische verbruikers is er nog een dynamische verbruiker (motor) waarvan de belasting kan variëren.



Figuur 27: Verbruikers proeftafel

Hieronder in Figuur 28 zijn de proeftafels van het zonnepark en de batterijopslag weergegeven. In het principeschema zorgt het zonnepark met het PV-systeem, dat bestaat uit een zonnepaneel-emulator en een netgekoppelde omvormer, voor de productie van elektriciteit. Vervolgens kan deze productie rechtstreeks gebruikt worden door een gebruiker, de batterij opladen of op het net (het busbar-systeem) gezet worden. De batterijopslag bestaat uit een grote zonnecell die het teveel aan zonne-energie kan opslaan of extra energie beschikbaar kan stellen als reserve wanneer er geen zon is.



Figuur 28: Batterijopslag en zonnepark proeftafels

De volgende twee proeftafels uit het principeschema zijn de twee energiecentrales (Figuur 29), de gascentrale en de waterkrachtcentrale. Deze tafels zijn identiek van opbouw maar de regeling verschilt. Ze hebben beiden een synchrone generator die energie opwekt en levert aan het net. Het verschil tussen de twee centrales is dat de waterkrachtcentrale naast energieproductie ook energie kan opslaan. Deze opgeslagen energie kan dan gebruikt worden als reserve energiebron.



Figuur 29: Energiecentrale en waterkrachtcentrale proeftafels

De voorlaatste proeftafel uit het prinsipeschema is deze van de transformatoren (Figuur 30). Deze bevat enkele verbruikers en een scheidingstransformator.



Figuur 30: Transformatoren proeftafel

Het laatste deel van het prinsipeschema is de HVAC proeftafel (Figuur 31). Deze bevat een transmissielijnmodel van 150 of 300 km, een ondergronds kabelmodel met een lengte van 12,5 of 37,5 km, enkele verbruikers en een regelbare transformator die bestuurd kan worden vanuit het SGCC.

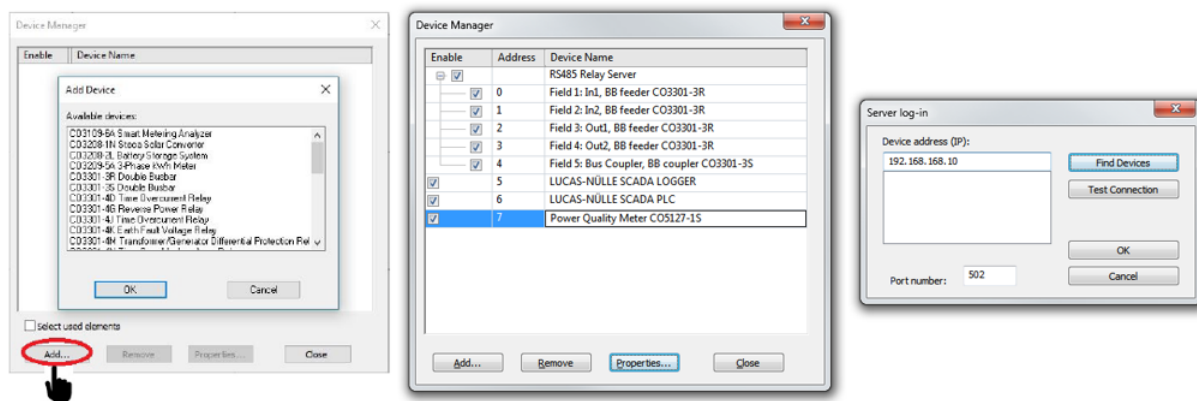


Figuur 31: HVAC proeftafel

Het prinsipeschema geeft overzichtelijk weer wat allemaal in de smart-grid-opstelling aanwezig moet zijn. De tien verschillende proeftafels zijn erin geïntegreerd en de hoofd hardwarecomponenten zijn beschreven.

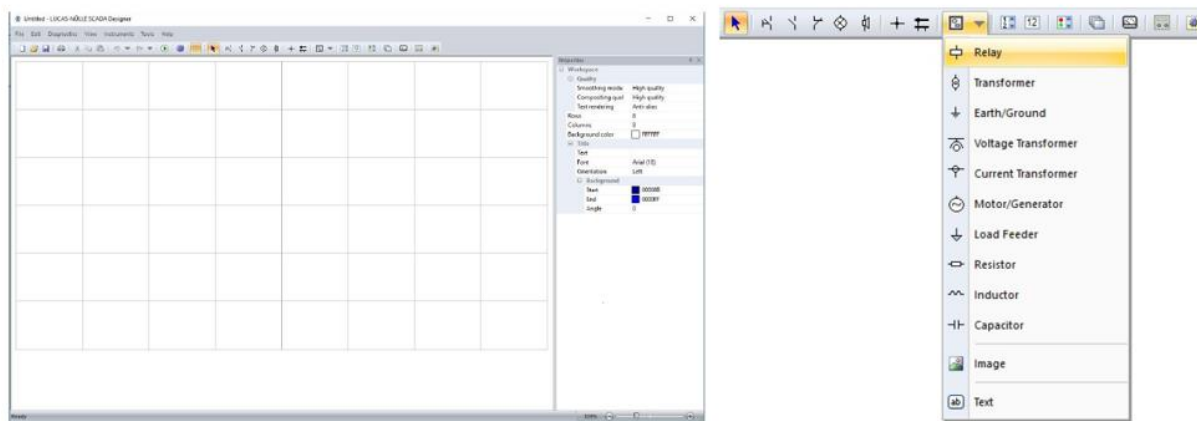
3.2.3. SCADA van de smart-grid-opstelling

Met behulp van de SCADA-Designer-software zijn de HMI's voor de smart-grid-opstelling ontworpen. De eerste stap in het ontwerpen van de user interface is nagaan welke componenten in de inventaris in de HMI opgenomen moeten worden. Elke component die verbonden is via ethernetkabel kan via de SCADA-server gekoppeld worden. Met behulp van de *device manager* in de SCADA-Designer worden de verschillende componenten toegevoegd aan het ontwerp. Daarna krijgen ze in de device manager een nuttige naam en wordt het juiste interne IP-adres aan de bijhorende component gekoppeld. In Figuur 32 is het proces om een component toe te voegen in de device manager weergegeven.



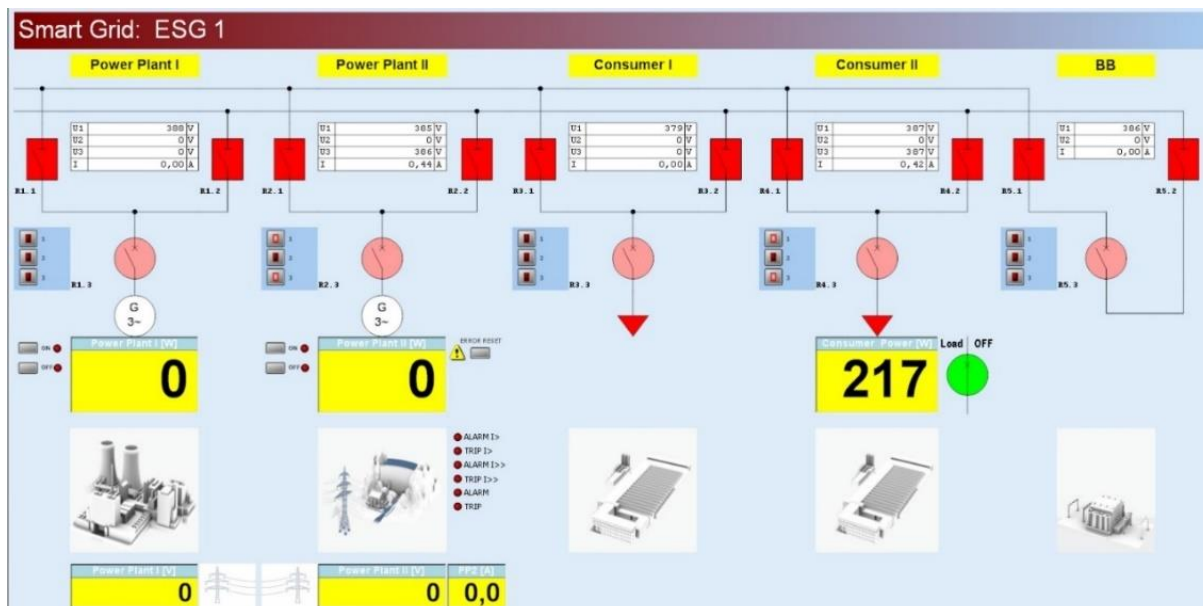
Figuur 32: SCADA-Designer device manager

Vervolgens kan in de SCADA-Designer de lay-out van de HMI ontworpen worden. Figuur 33 geeft de SCADA-Designer-workspace weer, waar verschillende elementen kunnen toegevoegd worden om de symbolische lay-out van het ontwerp te maken. Deze elementen staan rechts in de figuur. Aan deze elementen of controle panelen kunnen signalen van de toegevoegde componenten gekoppeld worden.



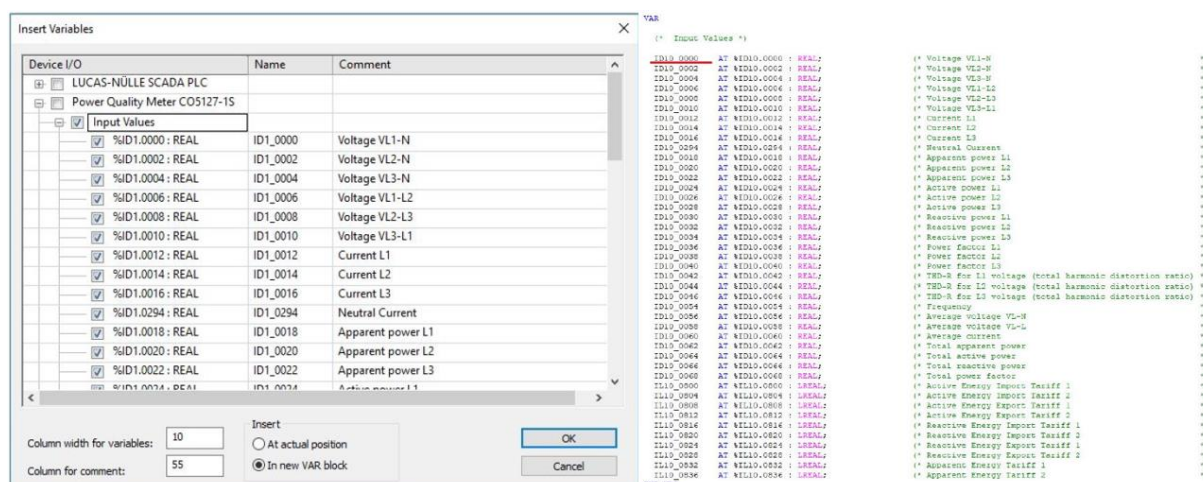
Figuur 33: SCADA-Designer-workspace

Figuur 34 toont een voorbeeld HMI, waarop verschillende elementen, afbeeldingen, tekst, knoppen en uitlezingen van metingen te zien zijn. Aan al deze elementen zijn signalen gekoppeld van toegevoegde componenten. Zo wordt bijvoorbeeld een vermogen van 217 W van een slimme meter uitgelezen onder het veld van Consumer II. M.a.w. aan de hand van de SCADA-Designer is het mogelijk om een goede HMI te ontwerpen voor de smart-grid-opstelling en de smart-grid-scenario's.



Figuur 34: Voorbeeld HMI

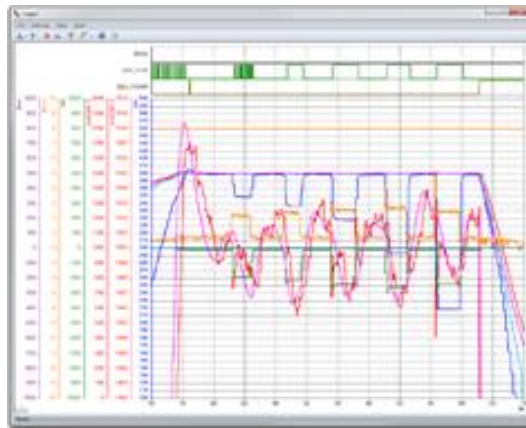
De volgende stap in het ontwerpproces is het toevoegen van de SCADA-PLC in de SCADA-Designer via de device manager. De LN-SCADA-PLC is een software-PLC waarin de logica van de componenten wordt geprogrammeerd, *Structured Text* is de programmatietaal. In het PLC-programma moeten variabelen toegevoegd worden, die worden gebruikt om informatie op te slaan of te verwerken. Om een variabele te gebruiken moet deze eerst gedeclareerd worden. Dit kan eenvoudig door de gewenste variabelen toe te voegen via de functie “*Insert list of variables*” van de SCADA-PLC. Figuur 35 toont een voorbeeld van het declareren van de variabelen van een slimme *power quality* (PQ) meter. Na het toevoegen van de vereiste variabelen krijgen deze een zinvolle naam naar keuze zodat ze bij het schrijven van het PLC-programma gemakkelijk te onderscheiden en onthouden zijn.



Figuur 35: SCADA-PLC variabelen declareren van een PQ-meter

De proeftafels met componenten die via USB verbonden zijn, zijn niet rechtstreeks verbonden met de SCADA-server, maar wel met de lokale computers van de bijhorende tafels. Voor de smart-grid-opstelling zijn dit de twee synchrone generatoren, de zonnepaneel-emulator, de motor van de verbruikerstafel en de generator van de windturbinetafel. Het aansturen en de logica van deze USB-componenten gebeurt in een lokale SCADA-HMI van de bijhorende tafel. Als we deze aansturing vanuit het SGCC willen besturen moet er in de SCADA-Designer een *SCADA Advanced Remote Control (RC) Server/Client* toegevoegd worden via de device manager. De HMI die verbonden is met de USB-componenten moet een server aanmaken, die vervolgens uit de centrale hoofd SCADA-HMI kan gevonden worden door een client aan te maken en deze te koppelen met de server. Hierdoor kunnen variabelen en metingen uitgewisseld worden tussen verschillende SCADA-HMI's en SCADA-PLC's, op één of meer computers die via ethernet met de SCADA-server verbonden zijn.

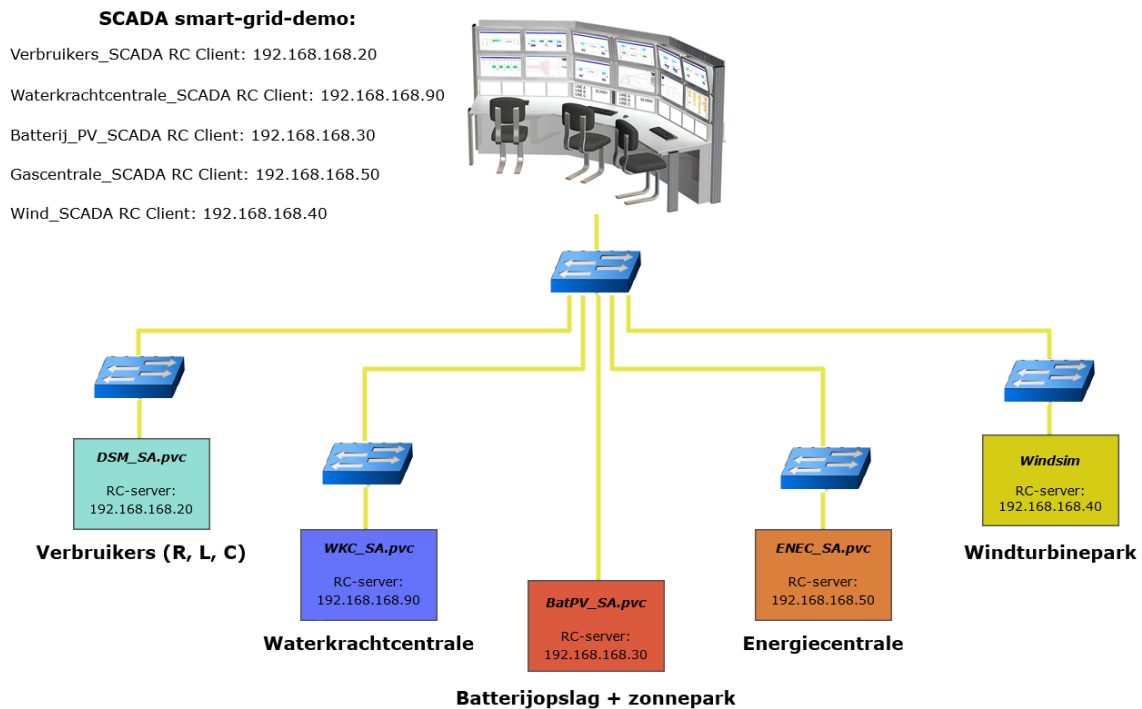
Om de opstelling verder te ondersteunen is het mogelijk om een SCADA-logger (Figuur 36) toe te voegen, waarmee meetwaardes op een grafiek uitgezet worden in functie van de tijd. Het is mogelijk om meerdere loggers toe te voegen en deze volledig naar wens aan te passen. Het is ook mogelijk om de gelogde waardes te exporteren en deze bijvoorbeeld te gebruiken in een Excel-file waardoor betere grafieken kunnen gegenereerd worden dan die van de logger zelf.



Figuur 36: Voorbeeld SCADA-logger

3.2.4. Besluit ontwerpmethodode

Aan de hand van de beschreven stappen is het mogelijk om voor de smart-grid-opstelling een werkende HMI te maken voor het SGCC waarin alles wat aangesloten is op de dubbele busbars gemonitord en bestuurd kan worden. De proeftafels waarop USB-componenten aangesloten zijn, zullen elk een eigen HMI krijgen waarin deze tafels geregeld worden. Dit betekent dat voor de gascentrale, de waterkrachtcentrale, de verbruikers en het zonnepark een SCADA RC server toegevoegd moet worden aan hun HMI's en dat per server een corresponderende client moet toegevoegd worden in de hoofd HMI van het SGCC. Figuur 37 toont de schematische weergave van de RC server-client relaties van de smart-grid-opstelling.



Figuur 37: Schema RC server-client relaties van de smart-grid-opstelling

3.3. Scenario's smart-grid-opstelling

Om de werking van het smart grid te demonstreren zijn twee scenario's uitgewerkt, namelijk enerzijds de balancing van het net en het onderzoeken van de spanningsregelingen en anderzijds de beveiligingen in het lokale smart grid. Beide scenario's kaderen in het netbeheer.

Tijdens de smart-grid-opstelling nemen de cursisten de rol aan van netbeheerder. De netbeheerder is verantwoordelijk voor het zorgen van een betrouwbare en kwaliteitsvolle elektriciteitsvoorziening. Om dit te verzekeren is een stabiel elektriciteitsnet van cruciaal belang. Netbeheer de stabiliteit van het net, deze stabiliteit bestaat uit drie soorten stabiliteit: frequentiestabiliteit, spanningsstabiliteit en hoekstabiliteit. De transmissienetbeheerder (TNB) is verantwoordelijk voor de frequentiestabiliteit en moet eerst en vooral het evenwicht bewaken tussen geleverd en gevraagd actief vermogen binnen haar eigen regelzone. De TNB van België is Elia en de regelzone is België.

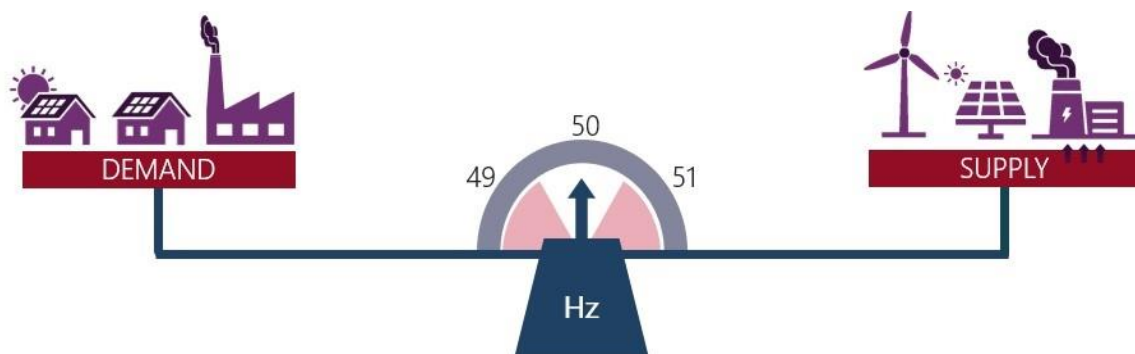
Frequentiestabiliteit is het stabiliseren van de frequentie op de nominale netfrequentie van 50 Hz. Dit is alleen maar mogelijk als de injectie en de afname van actief vermogen aan elkaar gelijk is. Spanningsstabiliteit is belangrijk voor de efficiënte werking van zowel het hoogspanningsnet als van elk ander elektrisch net op midden- of laagspanning. Spanningsstabiliteit vereist dat het reactief vermogen eveneens in evenwicht moet zijn. De laatste stabiliteit, de hoekstabiliteit heeft impact op de werking van de generatoren in het net. Op het moment dat het mechanisch vermogen van een generator het elektrisch vermogen van de generator niet meer in evenwicht kan houden is er onevenwicht in de fasehoek van de generatoren en schakelt de generator af. Hierdoor kan een grote hoeveelheid geproduceerde actief vermogen wegvallen wat grote gevolgen heeft op de frequentiestabiliteit van het elektriciteitsnet [43], [44].

Het eerste scenario, de balancing van het net onderzoekt bepaalde aspecten van de frequentiestabiliteit van het lokaal netwerk. Het tweede scenario rond de spanningsregelingen en beveiligingen onderzoekt de spanningsstabiliteit. In deze paragraaf wordt dieper ingegaan op het netbeheer en de acties die de netbeheerder moet ondernemen om een stabiel net te garanderen. Vervolgens wordt de analogie gemaakt met de smart-grid-opstelling.

3.3.1. De balancing van het net

Balancing van het net wijst op het evenwicht, de balans van het elektriciteitsnet. Het elektriciteitsnet is in evenwicht als de frequentie stabiel is en gelijk is aan de nominale frequentie van 50 Hz. Zoals hierboven reeds vermeld, moet er op ieder moment evenwicht zijn tussen de productie of de injectie van actief vermogen enerzijds en het verbruik of de afname van dit vermogen anderzijds. Om dit evenwicht te garanderen moet er voldoende flexibiliteit zijn bij de productie en/of het verbruik van elektrische vermogen. Bij een grote afwijking van het evenwicht is er kans op een *black-out* (stroomuitval), wat grote gevolgen kan hebben. Grootschalige opslagmogelijkheden zoals de pompcentrale van Coe vergroten deze flexibiliteit en kunnen werken als buffer om tijdens overproductie het teveel aan vermogen op te slaan. Op een later moment, wanneer de elektriciteitsvraag hoog is, kan dit opgeslagen vermogen gebruikt worden als reserve energiebron. Batterijparken zijn een alternatieve buffer, maar op dit moment zijn batterijen nog niet rendabel. In de toekomst is te verwachten dat zij wel een grote rol gaan spelen in de balancing van smart grids.

Een afwijking tussen het geproduceerd actief vermogen en het afgenomen actief vermogen resulteert in het dalen of stijgen van de frequentie, waardoor de frequentiestabiliteit verstoord wordt (Figuur 38). Om frequentieafwijkingen te compenseren moeten de generatoren sneller of minder snel beginnen te draaien, waardoor het toerental verandert. Een afwijking van het nominale toerental van een generator zorgt voor trillingen die schade kunnen veroorzaken aan de generatoren zelf. Afhankelijk van de grootte van de frequentieafwijkingen moet Elia acties ondernemen om het evenwicht te herstellen. Frequentiestabiliteit kan onderverdeeld worden in twee delen, enerzijds de balancing en anderzijds de frequentieregeling.



Figuur 38: Schematische weergave van de frequentiestabiliteit van het net [45]

Wanneer de frequentieafwijking ten gevolge van onbalans kleiner is dan 20 mHz en bijgeregeld wordt, spreken we van balancing. Als de afwijking groter is dan 20 mHz ten gevolge van onbalans of een incident en bijgeregeld wordt, spreken we van frequentieregeling. Hiertoe worden primaire, secundaire en tertiaire reserves ingeschakeld om zo de frequentie terug te stabiliseren. De primaire reserve wordt ook wel frequentiebegrenzingsreserve of FCR (*Frequency Containment Reserve*) genoemd. De secundaire reserve is hetzelfde als de frequentieherstelreserve met automatische activering of aFRR (*automatic Frequency Restoration Reserve*). De tertiaire reserve tenslotte, staat bekend als de frequentieherstelreserve met manuele activering of mFRR (*manual Frequency Restoration Reserve*) [46]. Als de frequentieafwijking door belasting -1 Hz wordt gaat de TNB lasten afschakelen om de belasting te verminderen. Dit proces wordt *load shedding* genoemd. Generatoren moeten actief vermogen blijven produceren tot een afwijking van -2,5 Hz of +1,5 Hz. De capaciteit van de generatoren om nog vermogen te leveren ondanks een grote frequentieafwijking wordt *fault ride through* (FRT) genoemd. Als de afwijking deze grenzen overschrijdt, worden de generatoren afgekoppeld en is er een black-out [47]. Tabel 1 toont een overzicht van de verschillende frequentieafwijkingen.

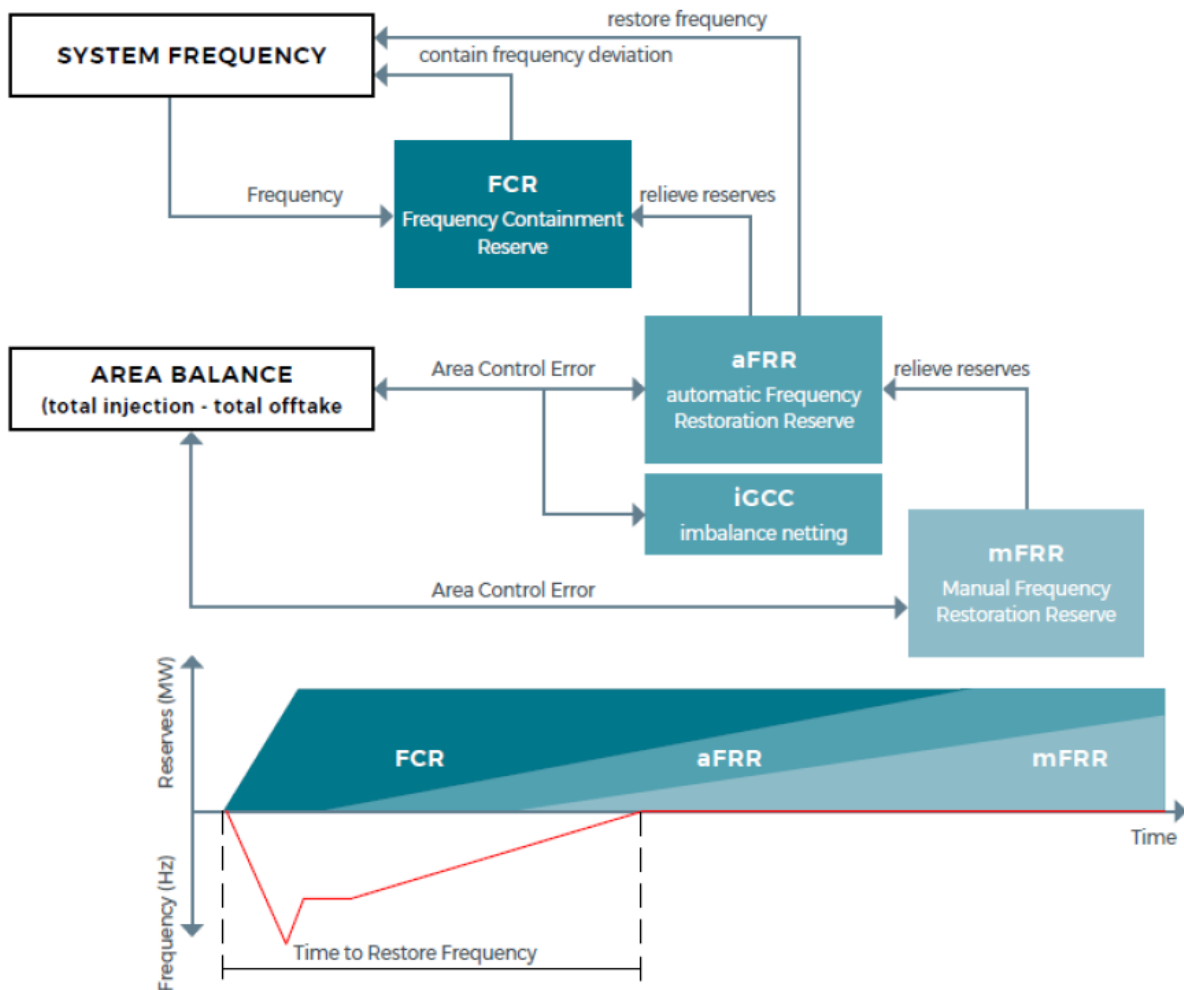
Tabel 1: Frequentieafwijkingen en de daarmee gekoppelde acties [47]

Δf	Δf en daarmee gekoppelde acties
± 10 mHz	Nauwkeurigheid frequentiemeting
± 20 mHz	Δf opvangen via balancing
± 200 mHz	Δf opvangen via reserves
- 1 Hz	Last afschakelen (load shedding)
tot -2,5 Hz Tot +1,5 Hz	Generatoren moeten energie blijven leveren (FRT)
< -2,5Hz > +1,5 Hz	Generatoren worden afgekoppeld (black-out)

Om een black-out te voorkomen moet Elia ervoor zorgen dat haar regelzone gebalanceerd is. Ze kan dit echter niet alleen. “Elia beschikt op elk toegangspunt van het net over evenwichtsverantwoordelijken (*Balance Responsible Parties* of BRP’s) die mee instaan voor het behoud van het evenwicht tussen elektriciteitsproductie- en consumptie” [48]. Een toegangspunt is de fysieke plaats op het net waar elektriciteit kan worden afgenomen of geïnjecteerd, het zijn de fysieke connecties met het net. Aan elk toegangspunt moet een BRP worden aangeduid. Die BRP kan een producent, een grootverbruiker, een energieleverancier of -handelaar zijn [48]. Een BRP heeft zijn eigen evenwichtsperimeter. Dit is de verzameling van alle toegangspunten waar hij verantwoordelijk voor is. De BRP is verantwoordelijk voor het evenwicht tussen de totale injecties en de totale afnames (metingen op alle toegewezen toegangspunten van de evenwichtsperimeter, handel op de elektriciteitsmarkten, grensoverschrijdende import en export van vermogen en stroomuitwisselingen met andere BRP’s) per kwartier [48].

Een BRP moet een dag op voorhand aan Elia laten weten wat zijn verwachte injecties en afnames zijn binnen zijn evenwichtsperimeter. Om te zorgen dat de BRP’s voldoen aan hun contractuele evenwichtswaardes gebruikt Elia onevenwichtstarieven. Indien een BRP op kwartuurbasis een negatief onevenwicht vertoont in zijn evenwichtsperimeter, dient hij dit onevenwichtstarief te betalen [48]. Als dit onevenwicht positief is en er meer productie is dan nodig in zijn perimeter, zal hij van Elia een beloning krijgen gebaseerd op het onevenwichtstarief. De prijs van dit onevenwicht wordt per kwartier vastgesteld rekening houdend met de kosten die Elia heeft voor de activering van reserves om het evenwicht in het net te herstellen. Onevenwicht ontstaat door fouten in voorspelde injecties en afnames of door onvoorziene incidenten. Een BRP mag afwijken van zijn contractueel evenwicht, om in real-time Elia gebruik te laten maken van zijn middelen om het onevenwicht in de regelzone te beheersen. De middelen van de BRP worden dan gebruikt als reserves om frequentieafwijkingen te herstellen [47].

Als de reserves ingezet moeten worden omdat de frequentieafwijking groter is dan 20 mHz, is dit meestal een gevolg van een incident zoals het onverwacht uitvallen van een energiecentrale. Om zo een incident te compenseren worden de drie reserves beurtelings geactiveerd. De TNB gebruikt de reserves om het evenwicht te herstellen zoals weergegeven in Figuur 39. De primaire reserve regeling wordt als eerste geactiveerd. De FCR moet de frequentieafwijking binnen de 30 seconden stabiliseren en zorgen dat deze niet verder afwijkt. Vervolgens wordt de secundaire reserve regeling geactiveerd. De aFRR moet de FCR van de regelzone vrijmaken en de frequentie uiteindelijk op de nominale waarde brengen om een volgend incident te kunnen opvangen. De aFRR herstelt dus de frequentie terug naar 50 Hz en deze is volledig beschikbaar binnen de 7,5 minuten. Ten slotte wordt de tertiaire regeling geactiveerd. De mFRR wordt handmatig geactiveerd en moet binnen de 15 minuten volledig beschikbaar zijn. Deze dient als compensatie voor een langdurige, aanhoudende en/of zeer omvangrijke onbalans. Daarnaast wordt de mFRR nog gebruikt om de aFRR vrij te maken, zodat deze terug beschikbaar is voor andere incidenten [44].



Figuur 39: Schematisch overzicht van de activering van de reserves [44, p. 14]

In het smart-grid-labo is het niet mogelijk om een grote frequentieafwijking te simuleren, omwille van de limieten van de labo-infrastructuur. De stroomvoorziening is beperkt tot een maximale toelaatbare stroom van 2 A. In het BP kan de energie-uitwisseling van het busbar-systeem gemonitord worden, het BP stelt het evenwicht voor van de smart-grid-opstelling. Ondanks dat er geen frequentieafwijking te zien is op de slimme meters is het toch mogelijk om onbalans te creëren, door de productie of het verbruik van actief vermogen te verhogen of te verlagen. Om de balancing van het lokaal smart grid te onderzoeken, worden verschillende regelacties uitgevoerd om het totaal vermogen in de BP constant te houden. Dit kan men vergelijken met het regelen van de gecontracteerde vermogenflow naar een naburige regelzone.

Vanuit het SGCC kan alles wat aangesloten is op het dubbel busbar-systeem geregeld worden. In de smart-grid-opstelling kan het dubbel busbar-systeem gezien worden als de regelzone van Elia. De cursisten die de opstelling uitvoeren, spelen dan de rol van de TNB en zullen het evenwicht in het BP moeten regelen door middel van het regelen van de injectie en de afname van actief vermogen. De productie van elektriciteit in de opstelling gebeurt door de hernieuwbare energiebronnen (windturbinepark en zonnepark) en de twee energiecentrales (gascentrale en waterkrachtcentrale). Het batterijopslagsysteem kan gebruikt worden als buffer, energiereserve of verbruiker. In de opstelling is het mogelijk om verschillende incidenten te simuleren en vervolgens de balancing van het net te regelen.

3.3.2. Spanningsregelingen en beveiligingen in een smart grid

Voor de transmissie van elektrische energie geldt het volgende: om de verliezen te beperken, moet de spanning zo hoog mogelijk en de stroom zo laag mogelijk zijn, binnen de grenzen die door het net en door de spanningsbeperkingen zijn vastgelegd. Een goede spanningsstabiliteit is essentieel voor een efficiënte werking van het net. Om de netspanning op een geschikt en stabiel niveau te houden, kan Elia beroep doen op spanningsregelingsdiensten. De aanbieders hiervan worden ook wel *Voltage Service Providers* (VSP's) genoemd. De frequentie op het net wordt beïnvloed door het gedrag van actieve energie; de spanning wordt beïnvloed door reactieve energie. Analooq aan frequentiestabiliteit, moet voor spanningsstabiliteit het geïnjecteerde reactief vermogen gelijk zijn aan het afgenomen reactief vermogen. Het transport van reactief vermogen wijzigt het spanningsprofiel waardoor de spanning best lokaal geregeld wordt [43], [49]. Elia is verantwoordelijk voor de spanningsregeling en doet hiervoor beroep op de hulp van de VSP's en assets die op het net zijn aangesloten.

Elia moet op elk moment in haar regelzone over voldoende reactief vermogen beschikken om de spanning te kunnen regelen en te stabiliseren in geval van een incident. Wanneer de spanning in de zone weer gestabiliseerd is (na het incident) moet Elia deze binnen de limieten houden om de netveiligheid te garanderen. De op het net aangesloten assets beschikken over capaciteit voor het leveren van reactief vermogen. Om de netspanning op een geschikt en stabiel niveau te houden, doet Elia beroep op dit reactief vermogen. Naargelang het spanningsniveau dat op het net gemeten wordt, stabiliseren deze assets de spanning door reactief vermogen te absorberen of te produceren via automatische of manuele activering. De eerste vorm van regeling wordt de klok rond automatisch uitgevoerd in antwoord op spanningsschommelingen terwijl manuele regeling occasioneel wordt uitgevoerd op vraag van Elia. Elia betaalt de VSP's voor deze diensten in verhouding tot het gemeten geleverd reactief vermogen [43], [49].

In de smart-grid-opstelling wordt de spanning lokaal geregeld op de verschillende proeftafels. De producenten van elektrische energie in het lokaal smart grid kunnen naast actief vermogen ook reactief vermogen leveren, waardoor het mogelijk is om de spanningsstabiliteit te onderzoeken in de smart-grid-opstelling. In dit scenario wordt naast de reactieve vermogensregeling ook nog de werking van een variabele transformator, de FRT van windturbines op spanningsschommelingen en STATCOM onderzocht.

Het tweede deel van dit tweede scenario bestaat uit het onderzoeken van de beveiligingen in het smart grid. De smart-grid-opstelling bevat drie soorten beveiligingen: een overstroombeveiliging, een over- en onderspanningsbeveiliging en generator beveiliging. Door fouten te simuleren kan in de smart-grid-opstelling de werking van deze beveiligingen onderzocht worden.

4. Resultaten en discussie

Gebruik makend van de materialen en de methode van hoofdstuk 3 is de smart-grid-opstelling ontworpen. Deze opstelling benut optimaal de labo-infrastructuur en de maximale test- en aanstuurmogelijkheden van de LN-apparatuur zijn erin verwerkt. In dit hoofdstuk worden de mogelijkheden van de ontworpen smart-grid-opstelling besproken.

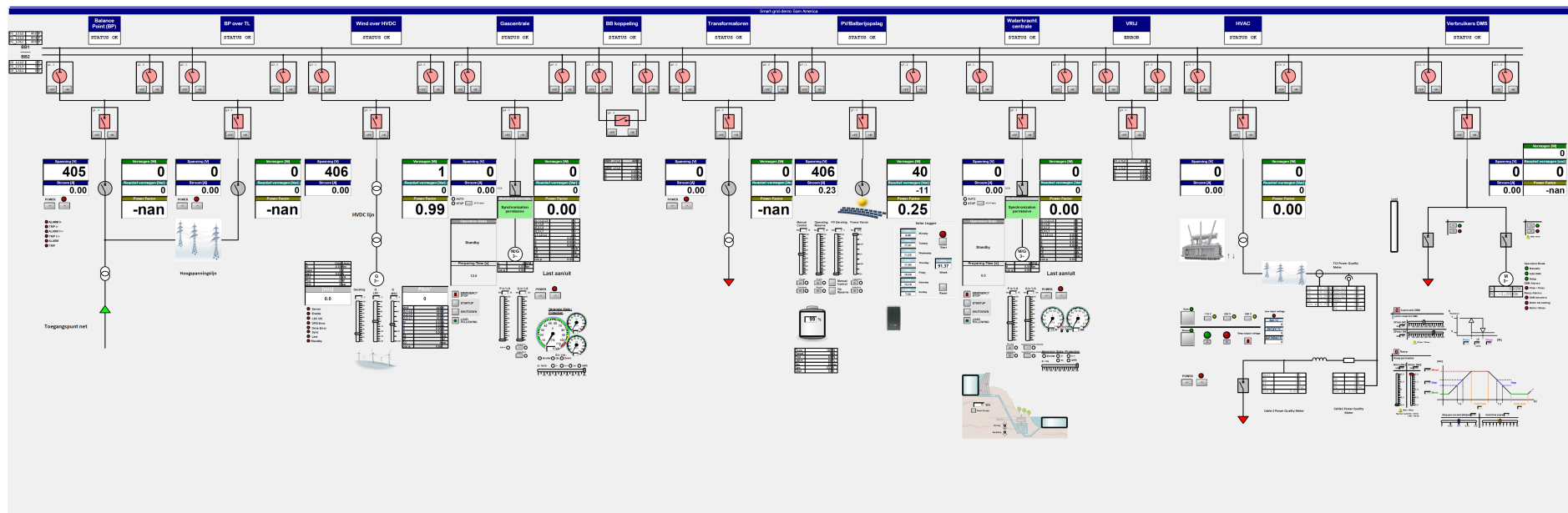
De SCADA-HMI's vormen de kern van het ontwerp, via deze HMI's kan het complete smart grid aangestuurd worden. In 4.1 wordt de SCADA van de opstelling uitgebreid besproken. 4.2 bespreekt de balancing van het lokale smart grid waarbij de gebruiker de smart-grid-opstelling gebruikt om de het vermogensevenwicht te garanderen en de rol van de TNB opneemt. In 4.3 worden de verschillende spanningsregelingen die in de smart-grid-opstelling aanwezig zijn besproken. Met behulp van deze regelingen kunnen de gebruikers de spanningsregeling van het smart grid onderzoeken. Ten slotte volgt in 4.4 de evaluatie van de opstelling en de compatibiliteit met de gestelde ontwerpisen.

In de testopstelling worden verschillende hardware componenten gebruikt. De gedetailleerde omschrijving van deze componenten is terug te vinden in 0. Omdat de figuren van de ontworpen SCADA-HMI's klein zijn, staan deze in 0 in het groot weergegeven.

4.1. Smart-grid-opstelling gestuurd vanuit SCADA

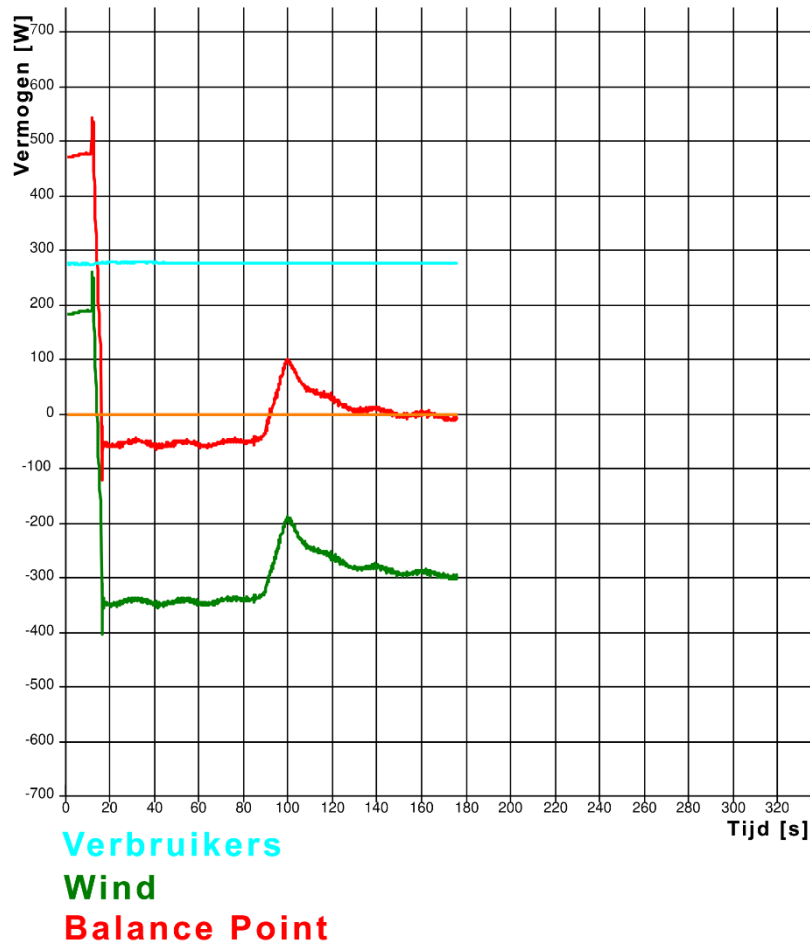
De tien proeftafels zijn via het dubbele busbar-systeem van het SGCC verbonden met het net. Het toegangspunt van dit net is de BP. In de opstelling is er de keuze om de BP rechtstreeks op het busbar-systeem te koppelen of via een transmissielijnmodel met een lengte van 150 km of 300 km.

Vanuit het SGCC is het mogelijk om het complete lokale smart grid te regelen en te monitoren via de hoofd SCADA-HMI van het SGCC. Elke proeftafel heeft één of meerdere IED's die verbonden zijn met het SCADA-netwerk. Uit deze IED's worden de volgende parameters van elke tafel uitgelezen in de hoofd HMI: het actief vermogen, het reactief vermogen, de arbeidsfactor of *power factor*, de spanning en de stroom. Figuur 40 geeft de ontworpen hoofd HMI van de smart-grid-opstelling weer. In deze HMI zijn de verschillende proeftafels, hun aansluiting op het dubbele busbar-systeem, de uitgelezen metingen en de verschillende regelementen per tafel zichtbaar.



Figuur 40: Hoofd HMI van de smart-grid-opstelling

Met behulp van SCADA-loggers kan elke gemeten waarde van een component visueel worden weergegeven in functie van de tijd. Deze loggers kunnen naar wens aangepast worden door de juiste parameters in te stellen. Om de balancing van het lokaal smart grid te onderzoeken is een logger aangemaakt waarin de actieve vermogens van het BP in real-time gemonitord worden. Bij een wijziging in geproduceerd actief vermogen of verbruikt actief vermogen zal er een onevenwicht ontstaan. In het voorbeeld van Figuur 41 hieronder is het evenwicht hersteld door het vermogen van de windturbine te verminderen. Op het einde van de logger is het actief vermogen van het BP terug op zijn oorspronkelijke waarde, hier nul. Dit wijst erop dat er geen vermogen uitgewisseld wordt met naburige regelzones.

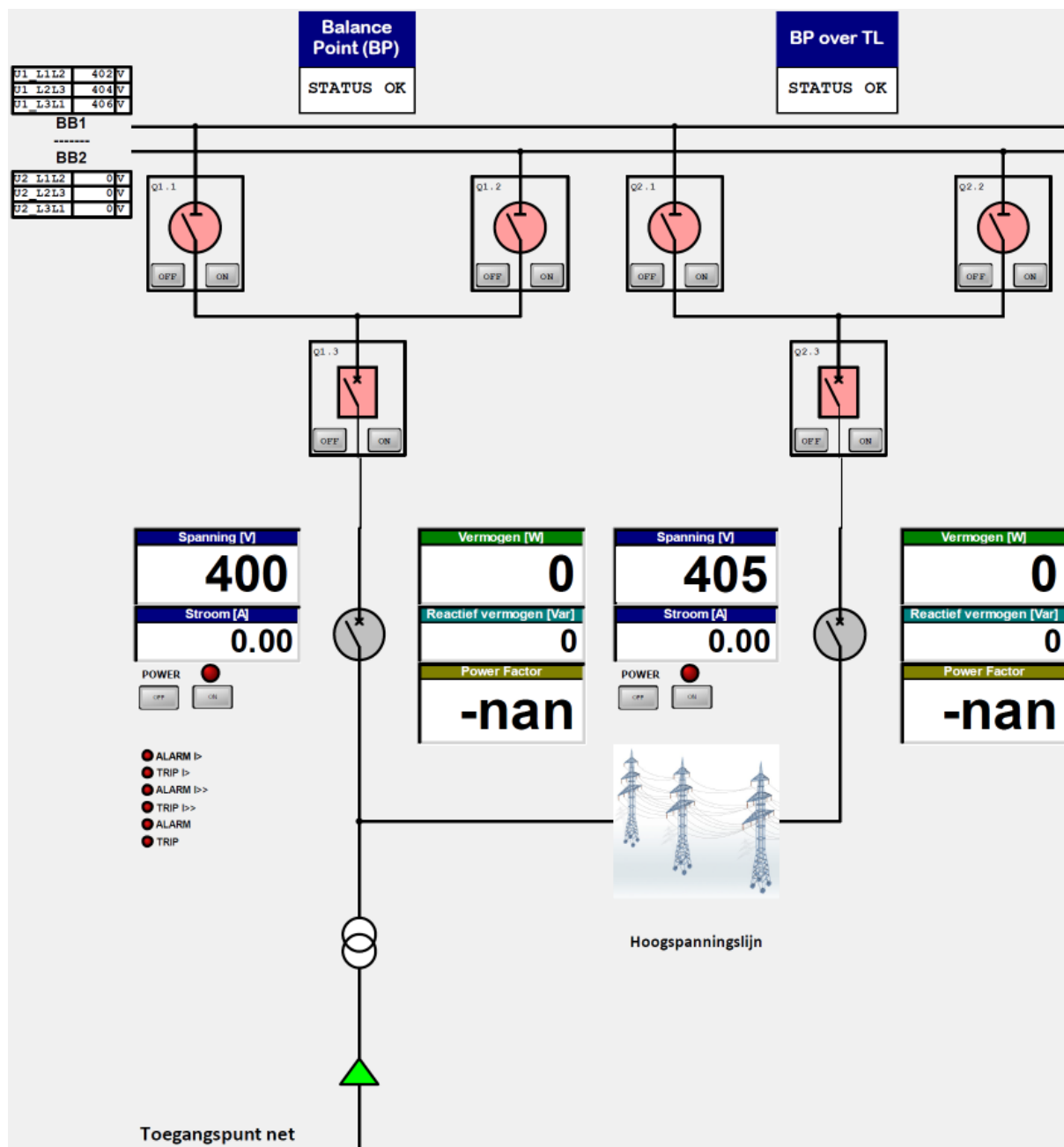


Figuur 41: Voorbeeld logger BP onevenwicht

Balance Point

In Figuur 40 zitten verschillende elementen verwerkt die de proeftafels regelen. Het eerste deel van de hoofd HMI van het SGCC is de koppeling van het busbar-systeem met het net. Deze koppeling gebeurt via het BP en kan zoals hierboven vermeld rechtstreeks of via een transmissielijn verbonden worden. Over de transmissielijn zullen echter door de inductiviteit van de hoogspanningslijnen spanningsverschillen optreden. Op Figuur 42 is dit spanningsverschil te zien, het net waaraan de smart-grid-opstelling gekoppeld wordt is in het lab een regelbare voeding, die handmatig ingesteld wordt op 400V.

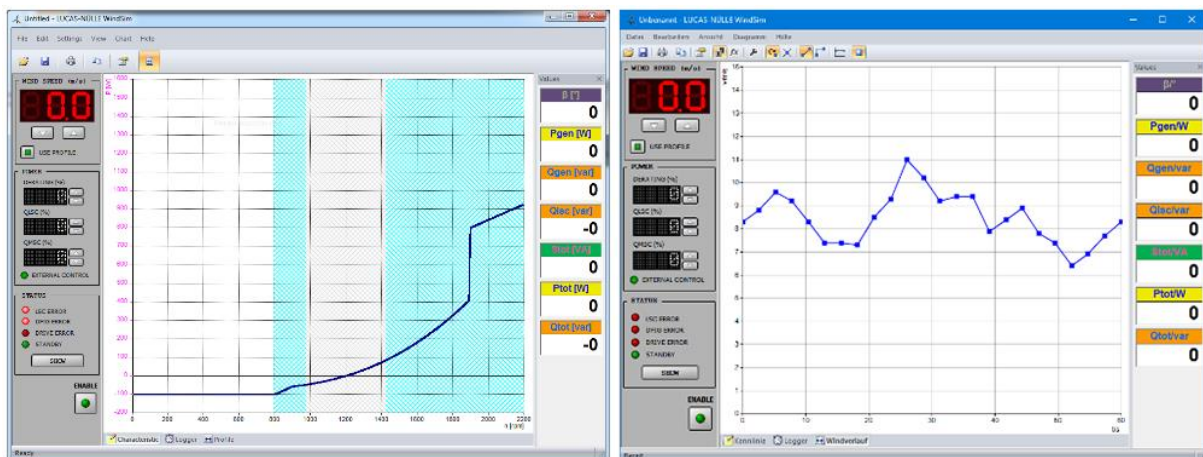
Het dubbele busbar-systeem bestaat uit verschillende koppelpanelen. Deze panelen bestaan uit een vermogensschakelaar en twee scheidingsschakelaars (isolatoren). Door het schakelen van deze koppelpanelen kan gekozen worden op welke busbar de proeftafels geconnecteerd worden.



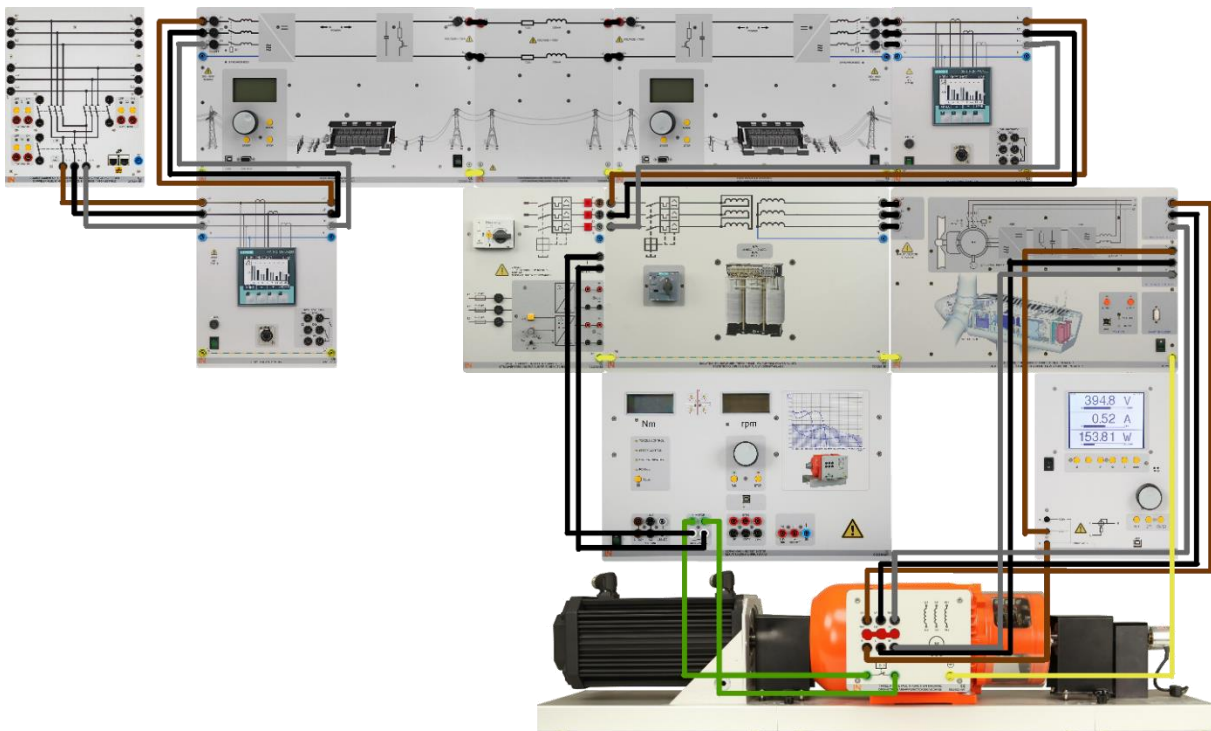
Figuur 42: Hoofd HMI regeling koppelen van het BP

Windturbine

Het tweede deel van de HMI bevat de regeling van de windturbine gekoppeld via een HVDC-transmissielijn. In de HVDC-omvormerstations wordt de spanning lokaal geregeld. De aandrijving van de windturbinegenerator heeft een USB-verbinding. Hiervoor moet zoals omschreven in 3.2.3 een RC server-client opgezet worden tussen het windturbinepark en de hoofd HMI in het SGCC. Voor het aansturen van de windturbine wordt WindSim gebruikt, WindSim is een software van LN waarin de gesimuleerde windsnelheid manueel of automatisch ingesteld kan worden (Figuur 43). In de automatische instelling volgt de windturbine een windprofiel. Dit windprofiel kan ofwel zelf ingesteld worden of vanuit data van windsnelheid-metingen uit de werkelijkheid ingelezen worden. De windturbine zal reageren op de gesimuleerde windsnelheden van dit windprofiel. De proefopstelling van de windturbine-proeftafel en de HVDC-proeftafel is weergegeven in Figuur 44.



Figuur 43: WindSim software en windprofiel



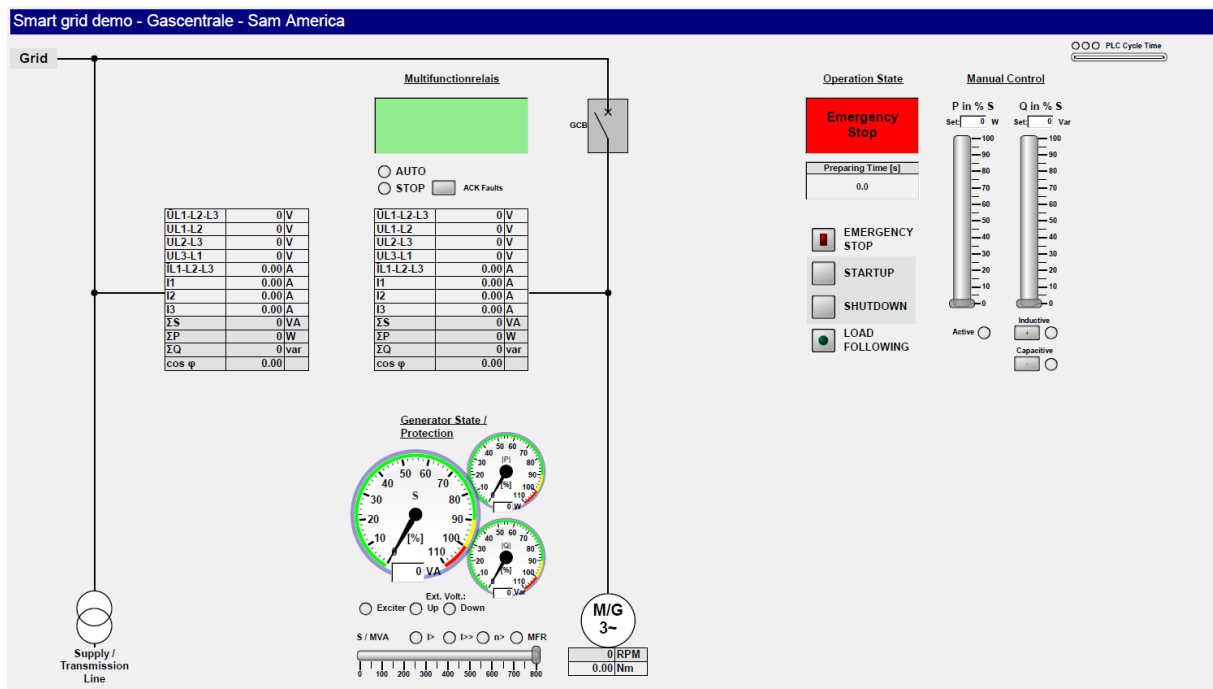
Figuur 44: Windturbinepark en HVDC-proefopstelling

Gascentrale en waterkrachtcentrale

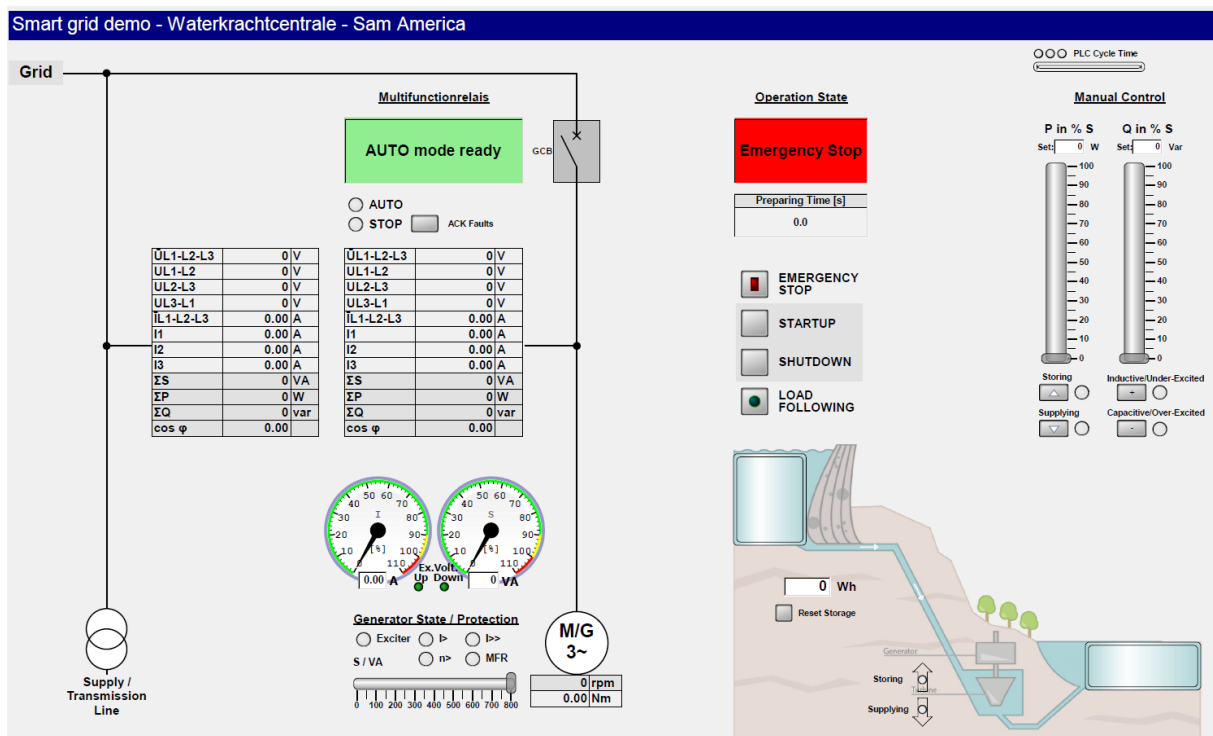
In de hoofd HMI staat naast het windturbinepark de regeling van de gascentrale. De gascentrale heeft een multifunctioneel relais waarin verschillende parameters aangepast kunnen worden. Het is bijvoorbeeld mogelijk om een minimaal vermogen in te stellen die de generator van de centrale altijd moet produceren, of om de opstarttijd van de generator in te stellen. Door deze parameters aan te passen kan de werking van verschillende soorten generatoren gesimuleerd worden. De gascentrale kan dan bijvoorbeeld omgevormd worden naar een andere centrale zoals een kolencentrale. Deze start trager op en reageert trager wanneer de TNB vermogen nodig heeft voor de balancing van het net.

De aandrijving van de generator heeft net zoals de windturbine ook een USB-verbinding wat betekent dat ook hier een RC server-client nodig is. De gascentrale heeft een eigen lokale HMI waar zijn lokale PLC-programmatie in zit. De generator kan zowel vanuit de lokale HMI als uit de hoofd HMI aangestuurd worden. De regelsignalen worden vanuit de hoofd HMI over de RC server-client verstuurd naar de software-PLC van de lokale HMI. Dit betekent dat er geen voorrangregels zijn tussen beide HMI's. Hetzelfde geldt voor de waterkrachtcentrale aangezien beide proeftafels identiek zijn. Het verschil tussen de gascentrale en de waterkrachtcentrale zit in de parameterinstellingen van het multifunctioneel relais.

In Figuur 45 is de HMI van de gascentrale te zien en in Figuur 46 de HMI van de waterkrachtcentrale. De waterkrachtcentrale kan naast het produceren van energie ook nog energie opslaan en kan in beide richtingen bijdragen aan de balancing van het smart grid.



Figuur 45: HMI gascentrale

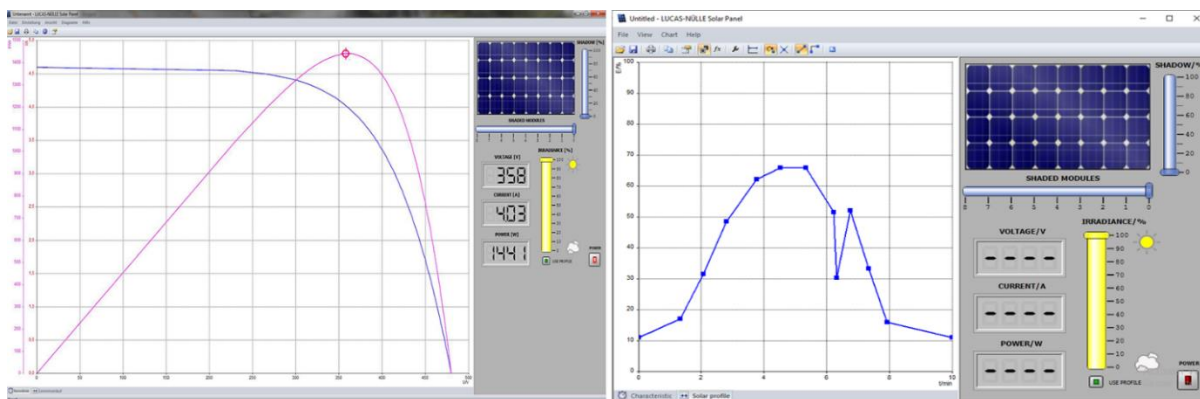


Figuur 46: HMI waterkrachtcentrale

Transformatoren, zonnepark en batterij

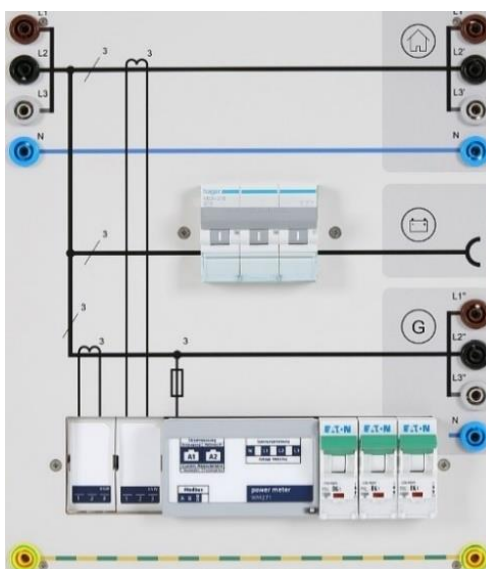
Het volgende deel uit de hoofd HMI zijn de transformator proeftafel en het zonnepark in combinatie met de batterijopslag. De transformatorproeftafel bevat enkel een scheidingstransformator en een belasting. Deze belasting kan handmatig veranderd worden naar wens. Vanuit de hoofd HMI kan de last in- en uitgeschakeld worden.

Voor het zonnepark en de batterijopslag is ook een SCADA RC server-client nodig met een bijhorende HMI. De PV-omvormer en de zonnepaneel-emulator zijn beide verbonden via een USB-verbinding, waardoor deze lokaal geregeld worden. Naast een lokale regeling is het ook mogelijk om deze via de hoofd HMI te regelen. De zonnepaneel-emulator wordt ingesteld door middel van de bijhorende software (Figuur 47) en is het mogelijk om de instralingssterkte van de zon in te stellen en de impact van schaduw op zonnepanelen te simuleren. Analoog aan het windprofiel in de WindSim software kan hier een instralingsprofiel worden ingeladen.

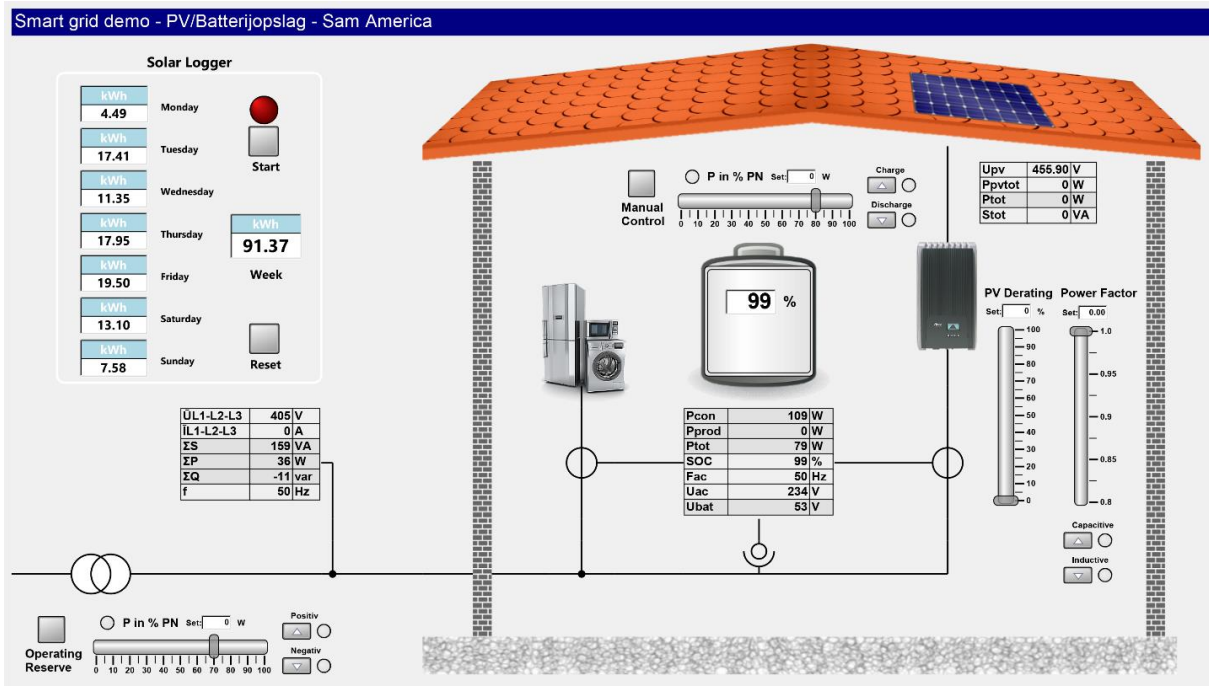


Figuur 47: Zonnepaneel-emulator software

In de SCADA-HMI van het zonnepark met de batterijopslag (Figuur 49) zijn drie hoofdelementen aanwezig: de PV-installatie, het batterijopslagsysteem en de verbruikers. Op de hardware component van de batterij kan een verbruiker aangesloten worden (Figuur 48). De batterij zal in zijn automatische voorgesprogrammeerde werking proberen de elektriciteitsvraag van de verbruiker te compenseren wanneer er geen energieopwekking plaatsvindt uit de PV-installatie.



Figuur 48: Aansluitpaneel batterijopslagsysteem



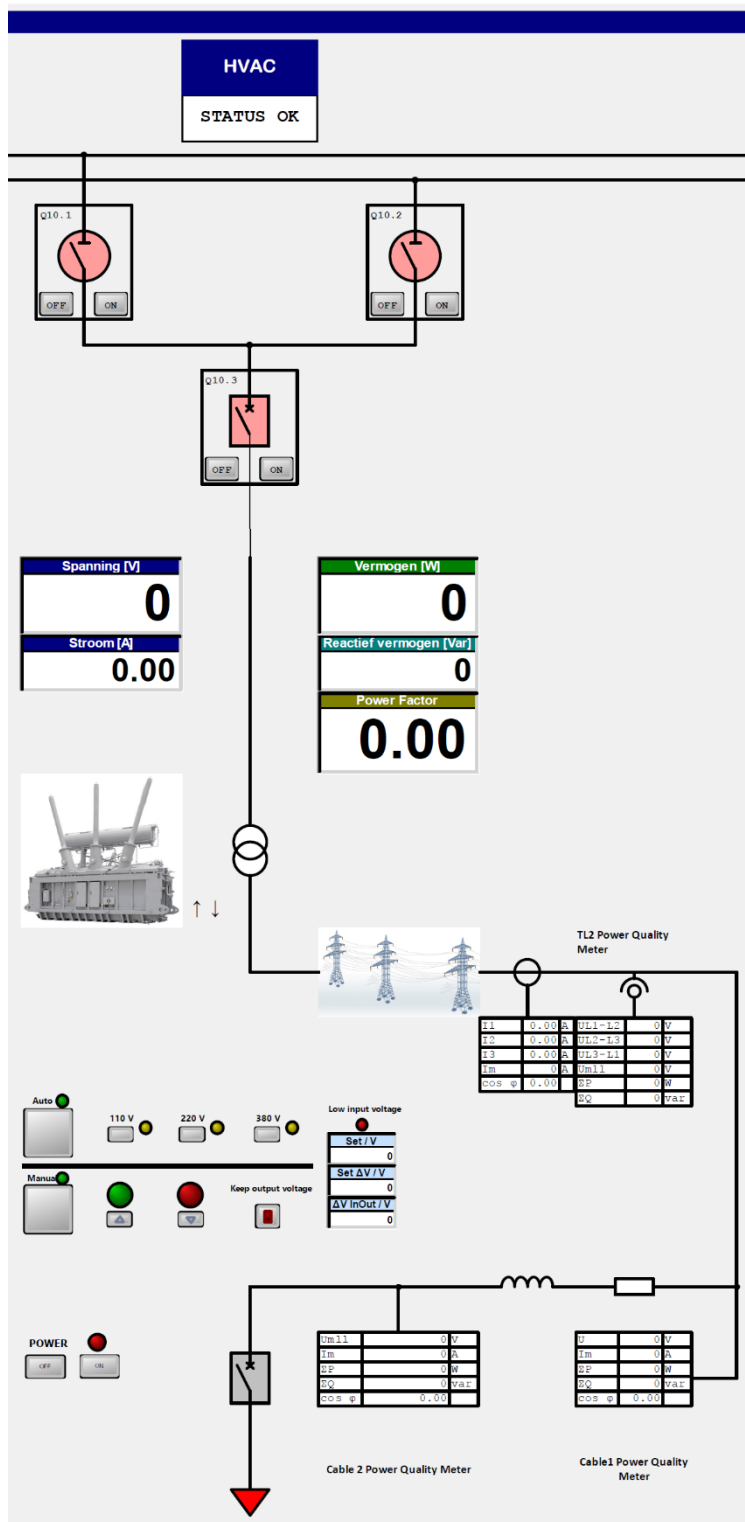
Figuur 49: HMI zonnepark met batterijopslag

Waterkrachtcentrale

De volgende proeftafel in de hoofd HMI is deze van de waterkrachtcentrale. De werking is bijna identiek aan die van de gascentrale en dit werd hoger, in de sectie over de gascentrale al besproken.

HVAC

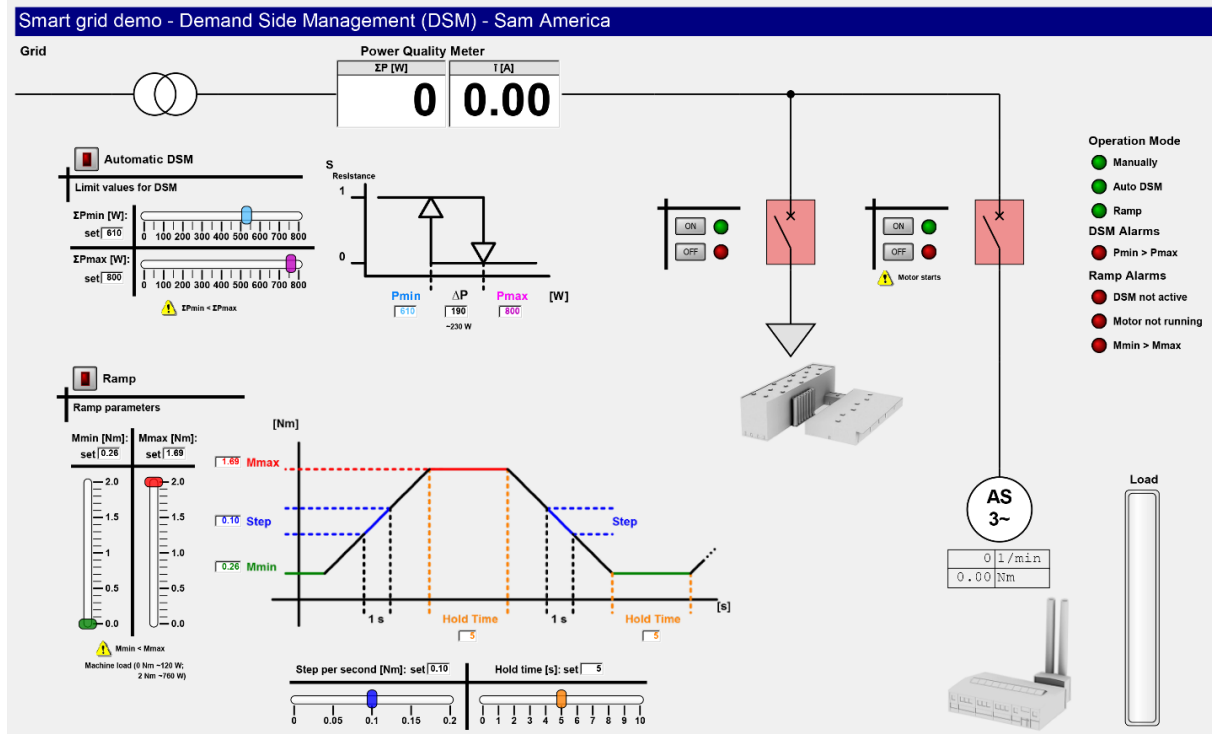
Naast de waterkrachtcentrale is de HVAC-proeftafel. In de HVAC-proeftafel van de smart-grid-opstelling is het mogelijk om de verschillende spanningsniveaus en spanningsverliezen te onderzoeken aan het begin en het einde van een transmissielijn of ondergrondse kabel. Net voor de aansluiting op het busbar-systeem is een transformator met variabele tapstand aangesloten. Deze transformator wordt vanuit de hoofd HMI aangestuurd (Figuur 50).



Figuur 50: Hoofd HMI aansturing HVAC-proeftafel

Verbruikers

Ten slotte is er nog de verbruikers proeftafel. De verbruikers proeftafel bestaat uit een statische last die handmatig veranderd kan worden en uit een dynamische last (motor). De aandrijving van de motor heeft een USB-verbinding zodat voor het regelen van deze lasten een SCADA RC server-client nodig is. De verbruiker proeftafel heeft ook een eigen lokale HMI (Figuur 51) en kan zowel lokaal als vanuit de hoofd HMI aangestuurd worden. Deze aansturing omvat voornamelijk het in- en uitschakelen van de statische last en de motor.



Figuur 51: HMI verbruiker proeftafel

Besluit hoofd HMI

De smart-grid-opstelling en de hoofd HMI benutten de complete labo-infrastructuur van het smart-grid-labo. In de opstelling zijn de maximale test- en aanstuurmogelijkheden van de LN-apparatuur geïntegreerd. Door middel van deze aanstuurmogelijkheden kunnen de scenario's uit 3.3 gemakkelijk onderzocht worden.

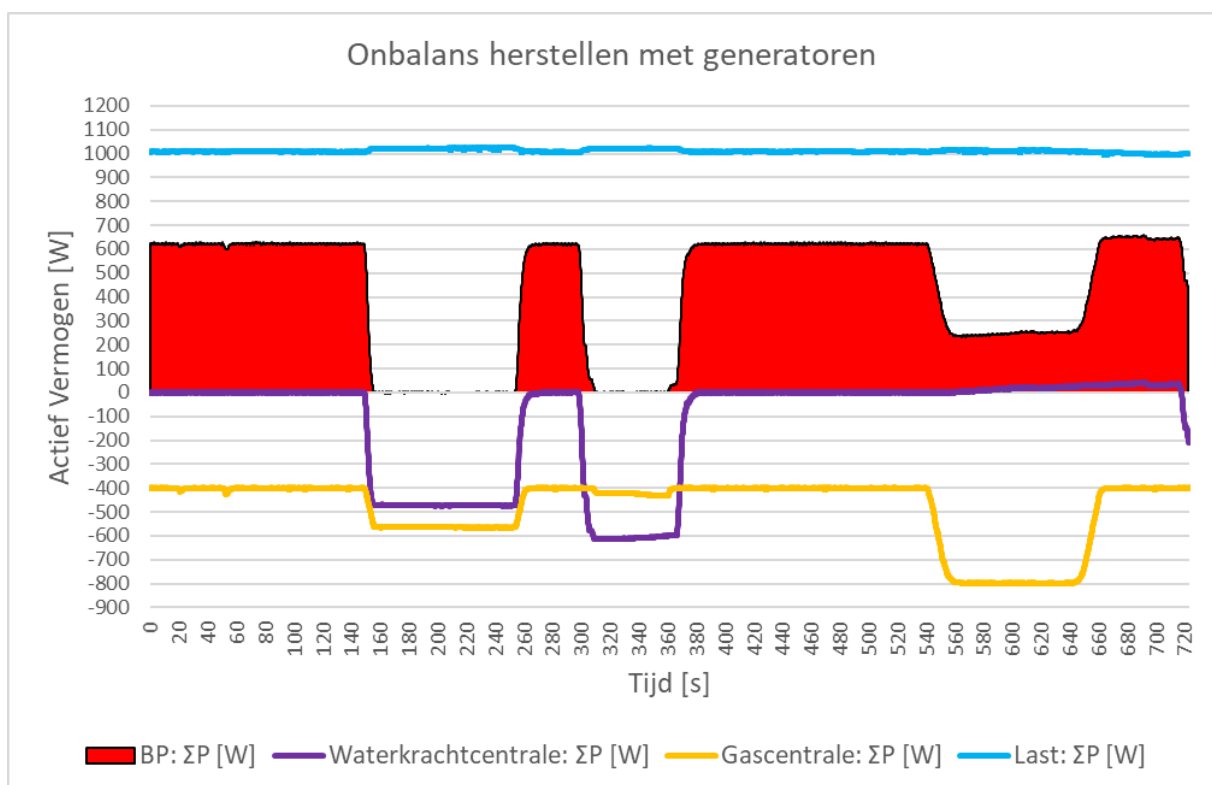
4.2. Balancing van het lokaal smart grid

In deze paragraaf worden enkele oorzaken van onbalans onderzocht evenals de verschillende regelingen die deze onbalans kunnen herstellen. Deze regelingen zijn naast de standaard interne regeling van het batterijopslagsysteem gerealiseerd aan de hand van PLC-programmatie.

4.2.1. Onbalans in het balance point

In het beschreven scenario is het BP in onbalans omdat een incident plaats vond in een naburige regelzone. Omwille van een vereiste vermogensuitwisseling naar de naburige regelzone raakt de TNB zijn regelzone in onbalans. Nadat het incident is opgelost, stopt de vereiste vermogensuitwisseling en moet de TNB ervoor zorgen dat zijn regelzone - in dit geval het lokaal smart grid - terug in evenwicht is. Na het incident staat het actief vermogen van het BP van de regelzone op 600 W wat betekent dat er nog 600 W actief vermogen geproduceerd moet worden om het BP terug in evenwicht te brengen. Er is geen uitwisseling van actief vermogen gewenst.

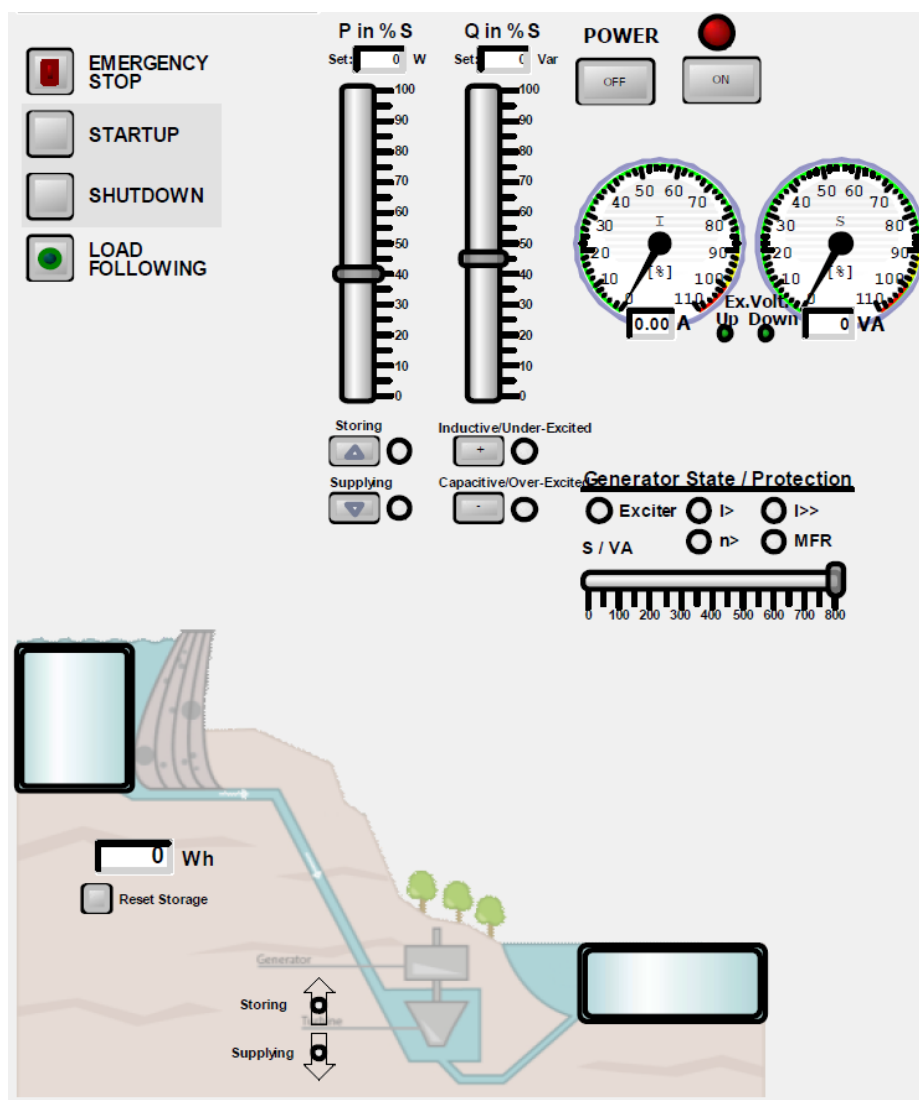
In Figuur 52 is de logger van het BP weergegeven. In dit scenario is onderzocht hoe de gascentrale en de waterkrachtcentrale deze onbalans herstellen en welke van de twee generatoren het snelste is. De generator van de gascentrale moet minimaal 400 W leveren, anders kan hij niet werken (dit is zo ingesteld in de lokale software-PLC). De statische last van de verbruiker-proeftafel is ingesteld op 1000 W. Op het begin van de logger is deze onbalans duidelijk te zien, het actief vermogen van het BP ligt ongeveer 600 W boven zijn evenwichtstoestand.



Figuur 52: BP logger van het onderzoek om de onbalans te herstellen met generatoren

Om deze onbalans te herstellen zullen de generatoren 600 W actief vermogen moeten injecteren op het busbar-systeem. Tijdens het loggen van dit scenario is de reactietijd van de generatoren getest. Vanaf ± 140 seconden is de onbalans hersteld en zien we duidelijk dat de waterkrachtcentrale veel sneller reageert dan de gascentrale. Verder in de logger is de onbalans terug voor het volgende experiment. Vanaf ± 300 seconden is de waterkrachtcentrale geactiveerd om de onbalans te herstellen. De waterkrachtcentrale compenseert de onbalans, daarna neemt de gascentrale een deel van de last over. Als laatste is in dit scenario nog onderzocht hoe het evenwicht hersteld wordt met enkel de gascentrale ter beschikking. Vanaf ± 540 seconden is in de logger te zien dat de gascentrale de onbalans probeert te herstellen. Het BP blijft hier nog steeds op 200 W staan, de generator kan maar maximaal 800 W leveren. Het is dus niet mogelijk om deze onbalans te herstellen met enkel de gascentrale.

Vanuit de HMI's van de generatoren is het mogelijk om het actief vermogen en het reactief vermogen van de generatoren handmatig of automatisch te regelen. Figuur 53 toont de verschillende regelementen die gebruikt kunnen worden om voor deze generator verschillende vermogens in te stellen. Deze regelementen zijn in de figuur die van de waterkrachtcentrale. Het enige verschil tussen deze regelementen en die van de gascentrale is dat er bij de gascentrale geen keuze mogelijk is om energie op te slaan of te leveren, de gascentrale kan enkel energie leveren aan het lokaal smart grid. De uitleg van de regelementen in de HMI en de werking van de regeling van de generatoren zijn samengevat in Tabel 2.



Figuur 53: SCADA-regeling generatoren

Tabel 2: Regelingen generatoren

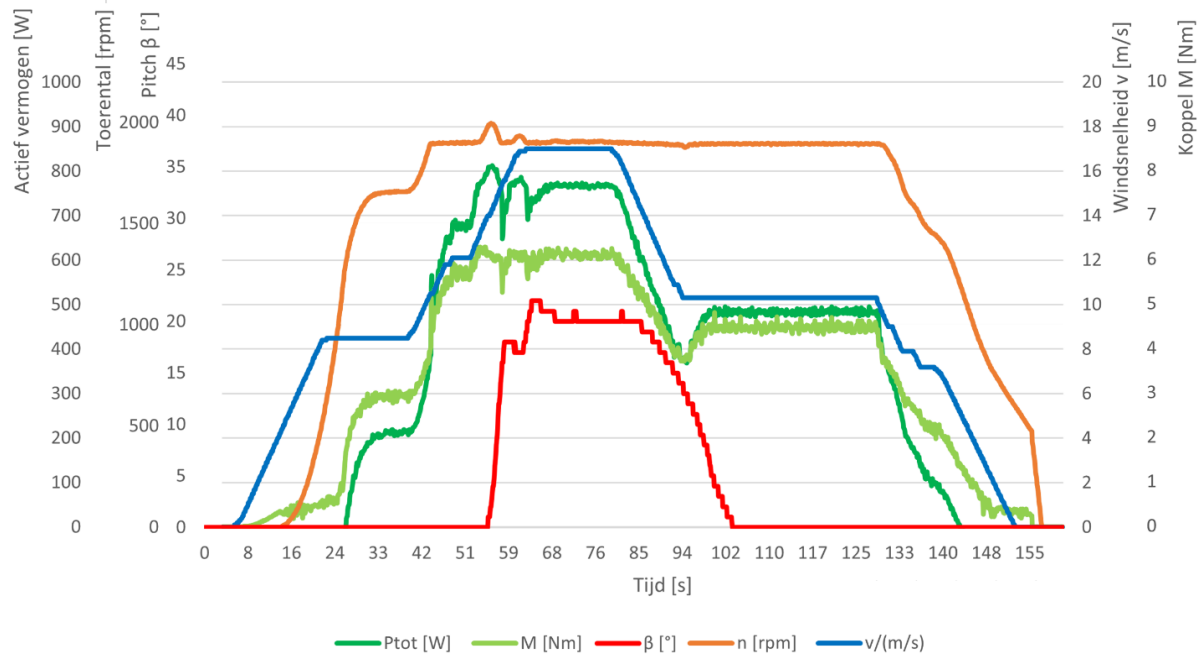
Regelement	Actie van de regeling
Emergency stop	Stopt de synchronisatie onmiddellijk en schakelt de machine uit.
Startup	Start de machine, synchroniseert deze met het net en voedt of verbruikt vermogen in overeenstemming met de vermogensinstellingen.
Shutdown	Verlaagt het vermogen van de machine tot nul, stopt de synchronisatie en schakelt de machine uit.
Load following	Automatische werking van de generator, het actief/reactief vermogen wordt gemeten op het BP en wordt in onbalans automatisch met de generator gecompenseerd.
P in %S	Manuele regeling van het actief vermogen. P/Q wordt geregeld als een percentage van S/VA (schijnbaar vermogen). Dat betekent dat bij 800 VA de generator een actief vermogen P kan leveren of verbruiken van -800 W tot 800 W. De richting waarin dit in werking treedt, kan worden gewijzigd met de knoppen "Storing" en "Supplying". Bij de gascentrale is er geen keuze, deze kan enkel vermogen leveren. Het actief vermogen kan nooit het schijnbaar vermogen overschrijden aangezien het als percentage ingesteld wordt van het beschikbaar schijnbaar vermogen.
Q in %S	Manuele regeling van het reactief vermogen kan op dezelfde wijze ingesteld worden als het actieve vermogen. Het type reactief vermogen kan gekozen worden door de knoppen "Inductive" (inductief of onderbekrachtigd) of "Capacitive" (capacitief of overbekrachtigd).
S/VA	Instellen van het maximaal schijnbaar vermogen.
Analoge meters	De analoge instrumenten tonen de belasting van de machine in procenten. De linkerschaal heeft betrekking op de nominale stroom van de machine, terwijl de rechterschaal betrekking heeft op het nominale vermogen.
Reset Storage	Deze knop zet de twee reservoirs terug in hun basistoestand met zowel het hogere als het lagere reservoir halfvol. Links is er het hogere reservoir met het water op hoog niveau, deze fungeert als een bron van opgeslagen potentiële energie.

4.2.2. Impact van variabele windsnelheid en windstoten

In dit deel wordt de impact van variabele windsnelheden en windstoten op de werking van de windturbine en het gevolg op het evenwicht van het lokaal smart grid nader bekeken. In Figuur 54 is de reactie van de windturbine op een variërende windsnelheid met enkele windstoten onderzocht. Hier zien we dat als de windsnelheid stijgt, het toerental en het koppel van de windturbine ook beginnen te stijgen. Vanaf het moment dat de windsnelheid hoog genoeg is (± 25 seconden) zal de windturbine koppelen op het net waardoor deze actief vermogen begint te leveren. Als de windsnelheid stijgt levert de windturbine meer vermogen. Vanaf ± 50 seconden treedt er een windstoot op van enkele seconden. Hierdoor zal het vermogen van de windturbine snel stijgen en zullen er pieken ontstaan in het geleverd vermogen waardoor er meer energie geïnjecteerd wordt in het net. Het geleverde vermogen van de turbine mag zijn nominaal vermogen niet overschrijden wat kan gebeuren bij te hoge windsnelheden of te krachtige windstoten.

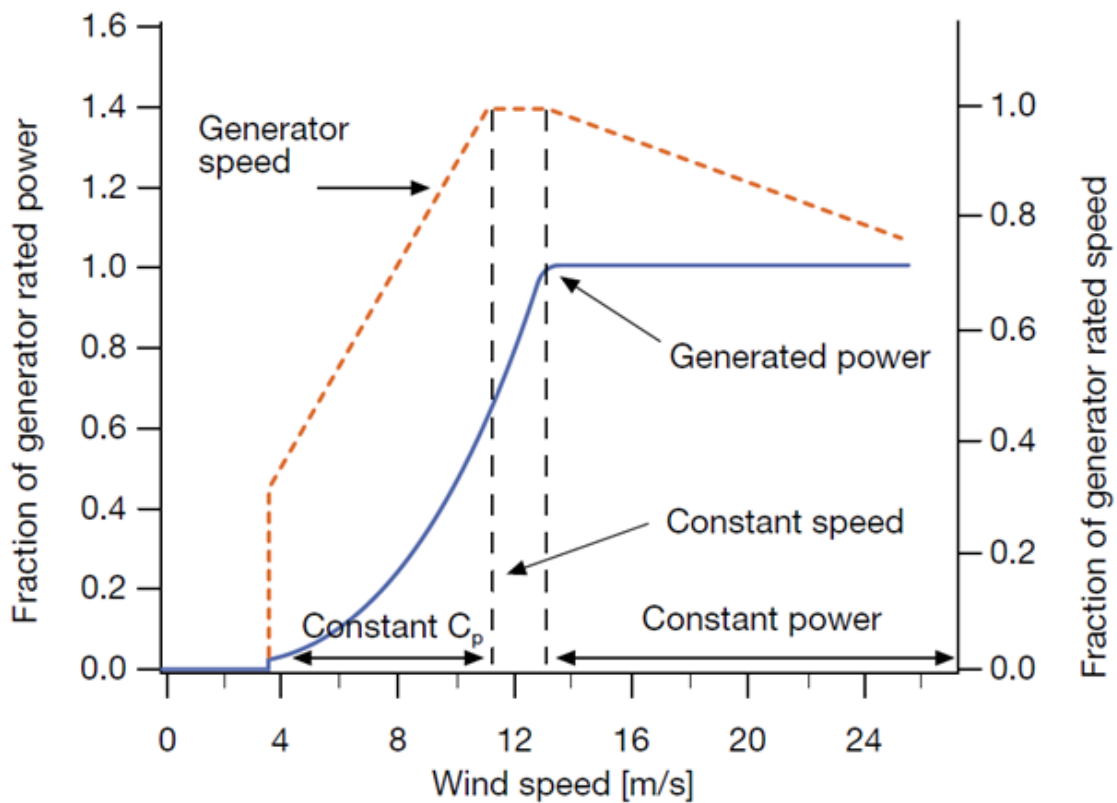
Om dit te voorkomen wordt de turbine gedwongen om minder vermogen te leveren door middel van pitchregeling of het uit de wind draaien van de turbine. Het verminderen van het actief vermogen noemt men *derating*. Dit gebeurt bij de windturbine dus door de pitchregeling. De *pitch* is de hoek van de wieken van de turbine. Tijdens het *deraten* van het vermogen wordt deze hoek groter waardoor de wieken uit de wind draaien, zodat de kracht van de wind op de wieken verlaagd wordt.

In de figuur is dit te zien vanaf ± 55 seconden wordt door een windstoot het vermogen te groot en wordt de pitchregeling actief. Hierdoor vergroot de pitch-hoek en is er een schokkend verloop in het geleverde actieve vermogen op de grafiek te zien. Wanneer de windsnelheid terug verlaagt zal het vermogen afnemen en zal de pitchregeling inactief worden waardoor de hoek van de wieken terug herstelt.



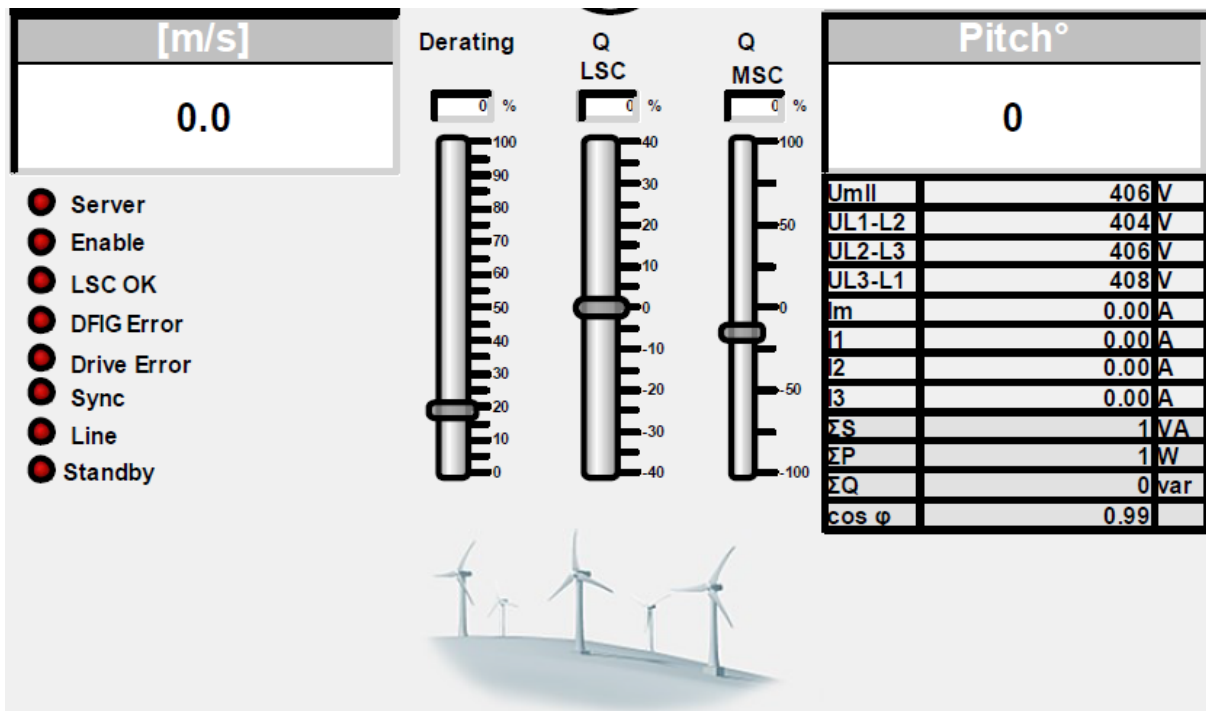
Figuur 54: Reactie windturbine op variërende windsnelheden en windstoten

De werking van de windturbine kan ook aan de hand van zijn productiecurve verklaard worden (Figuur 55). Het actief vermogen van de windturbine is afhankelijk van het koppel van de generator. Het vermogen kan geregeld worden door zowel het koppel van de generator te regelen als door het variëren van de pitch. Bij matige windsnelheden wordt het vermogen van een windturbine gewoonlijk door de koppelregeling met constante pitch en variabel toerental optimaal gehouden. Naarmate de windsnelheid toeneemt bereikt de generator in het algemeen zijn nominale snelheid voordat het nominale vermogen bereikt wordt. Zodra het nominaal vermogen bereikt is, wordt bij stijgende windsnelheid naast de koppelregeling ook nog de pitchregeling gebruikt om het actief vermogen te regelen en constant te houden op zijn nominale waarde. Ook het toerental van de turbine wordt zodanig geregeld om het actief vermogen binnen aanvaardbare grenzen te houden. Deze werking kan op de productiecurve gezien worden, het toerental zal dalen wanneer de windsnelheid zeer groot wordt. Op de figuur hierboven is dit niet te zien omdat er geen windsnelheid met deze grootteorde gesimuleerd werd [50].



Figuur 55: Productiecurve windturbine [50, p. 50]

In de bovenstaande figuren wordt de pitch automatisch geregeld, deze kan echter ook manueel geregeld worden vanuit de hoofd HMI van het SGCC. In Figuur 56 zijn de verschillende regelementen voor het windturbinepark weergegeven. In Tabel 3 zijn de verschillende regelingen van het windturbinepark samengevat.

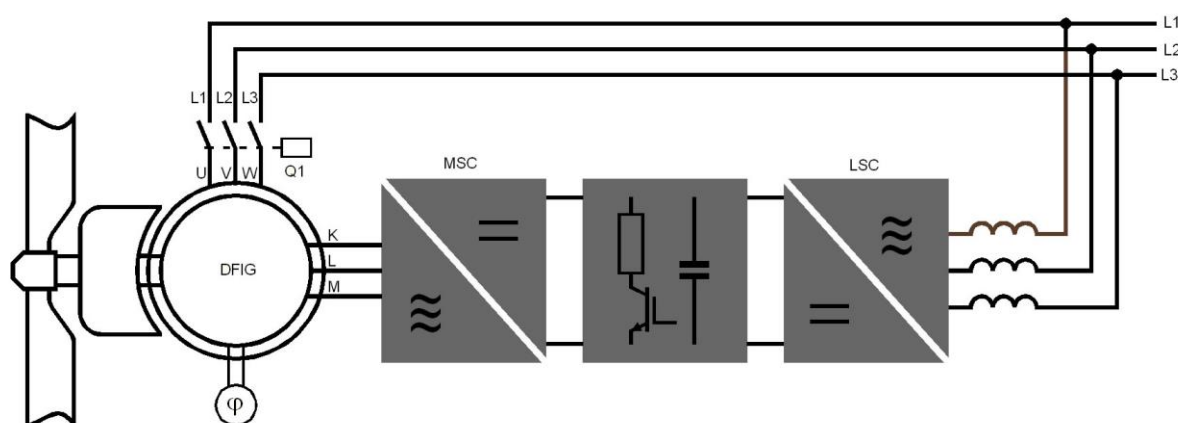


Figuur 56: SCADA-regeling windturbinepark

Tabel 3: Regelingen windturbinepark

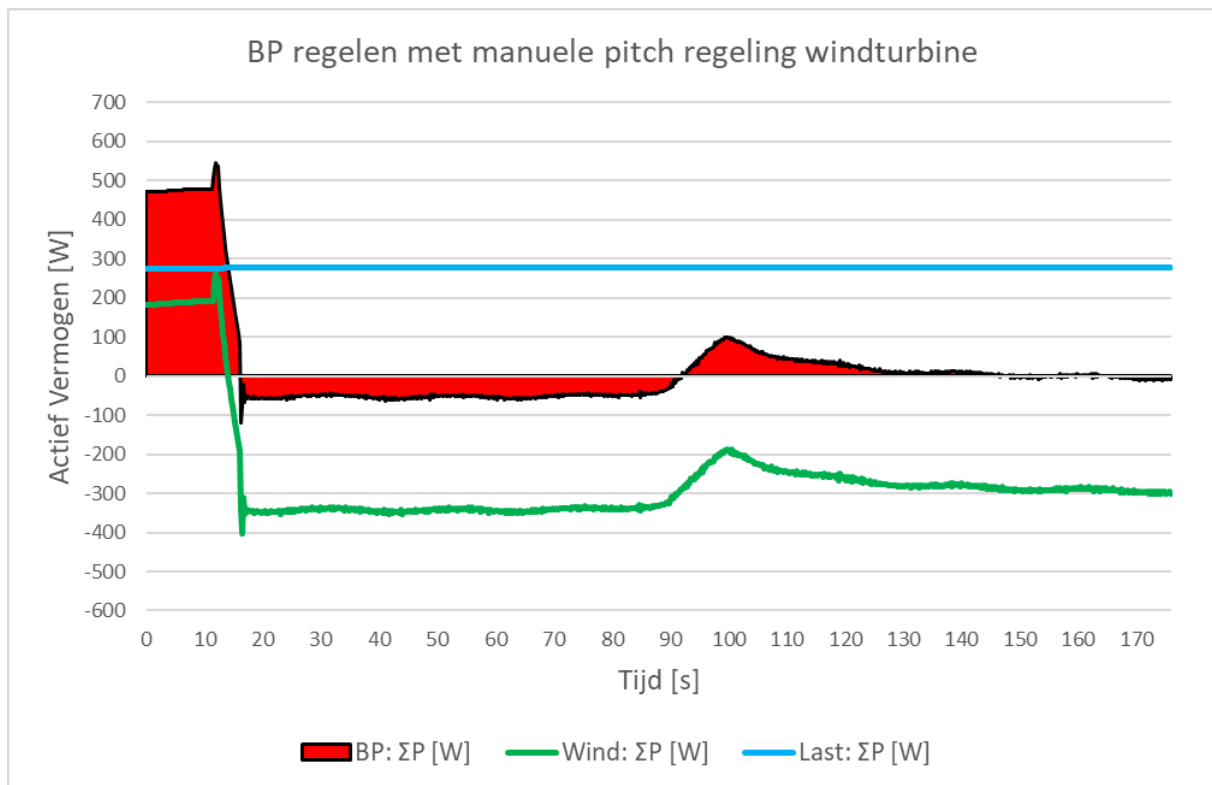
Regelelement	Actie van de regeling
[m/s]	Weergave van de windsnelheid.
Pitch °	Weergave van de pitch hoek.
Derating (%)	Instelling van de actieve vermogenderating in % (0% betekent geen vermogensvermindering. 100% betekent volledige vermogensbegrenzing = geen actief vermogen wordt toegevoerd aan het net).
Q LSC (%)	Reactief vermogen wat toegevoerd of verbruikt wordt aan de Line Side Converter (LSC), de netkant van de omvormer in de turbine.
Q MSC (%)	Reactief vermogen wat toegevoerd of verbruikt wordt aan de Machine Side Converter (MSC), de machine kant van de omvormer in de turbine.

In Figuur 57 is het blokschema van een windturbine te zien. Door het reactief vermogen aan te passen in de MSC en de LSC kan de spanning aan beide kanten geregeld worden.



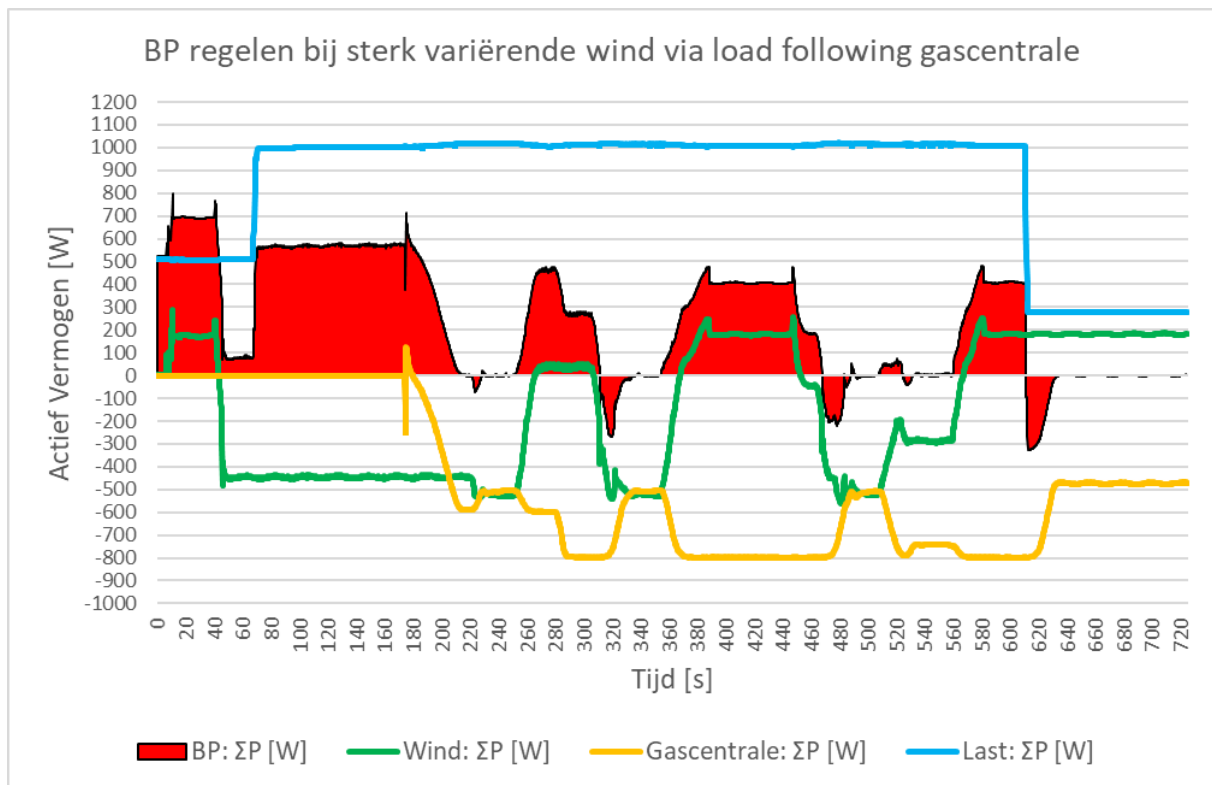
Figuur 57: Blokschema windturbine

In Figuur 58 is een voorbeeld van manuele pitch regeling weergegeven. In deze figuur is na 90 seconden de pitch manueel veranderd. Deze was eerst te groot ingesteld waardoor de windturbine te weinig vermogen leverende om het BP in evenwicht te houden. Vervolgens werd dit juist ingesteld waardoor op het einde van de grafiek het BP zijn evenwichtstoestand bereikt.



Figuur 58: Voorbeeld manuele derating voor de balancing van het lokaal smart grid

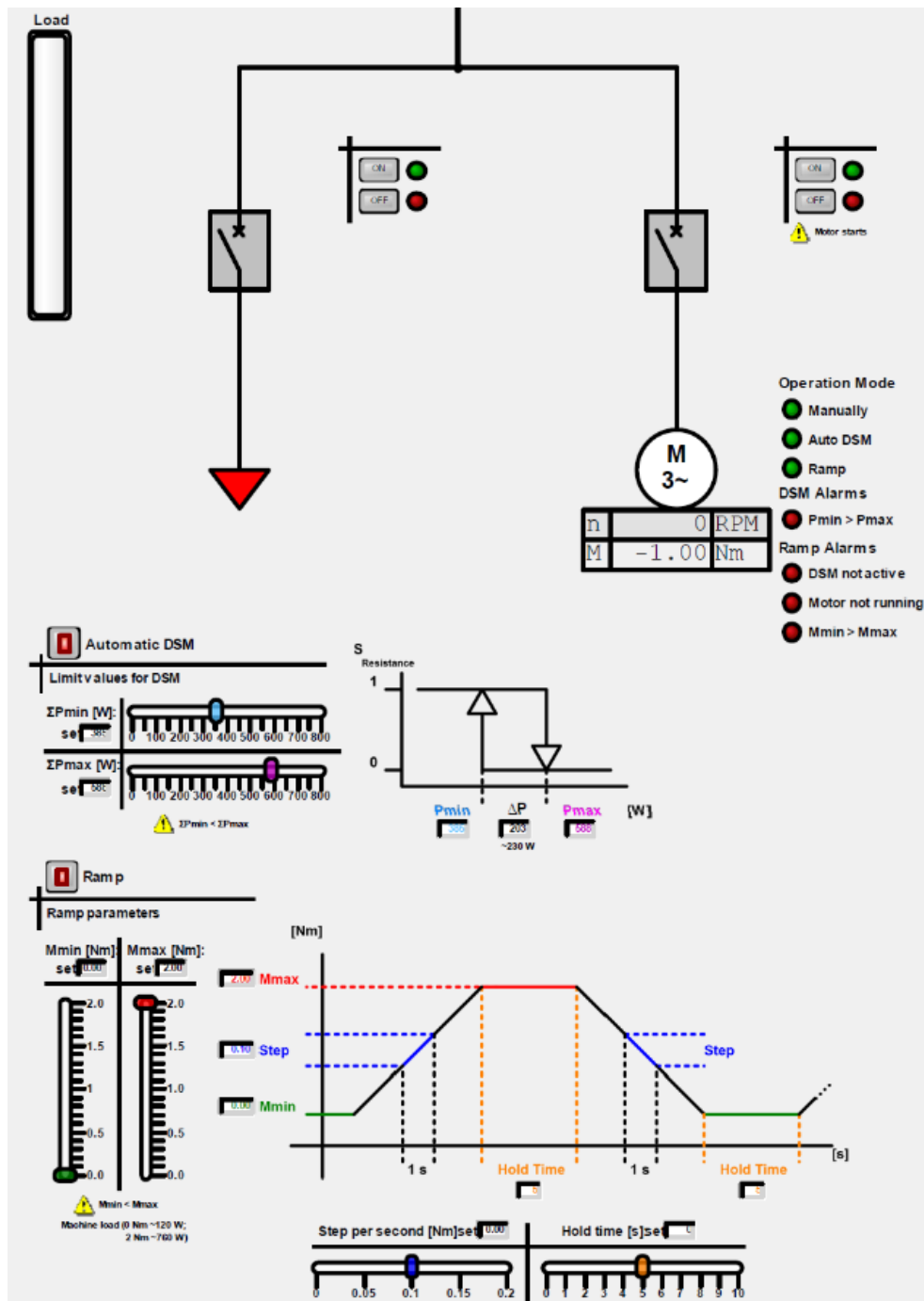
Om het gedrag van de winturbine bij een sterk variërende windsnelheid te onderzoeken is Figuur 59 gelogd. Een last van 1000 W is aanwezig op het BP waardoor deze in onbalans is. De windturbine levert in het begin een vermogen van ongeveer 450 W. Om de resterende onbalans te compenseren start de gascentrale, deze werkt in load following modus. Het BP is terug in zijn evenwichtstoestand en vanaf dat moment gaat de windsnelheid beginnen te variëren, waardoor op sommige momenten de windturbine van het net loskoppelt. De gascentrale zorgt ervoor dat het evenwicht binnen de grenzen blijft. Deze centrale kan maximaal 800 W vermogen leveren dus er blijft een afwijking van de evenwichtstoestand. In de figuur is automatische balancing van het net goed te zien bij variabele windsnelheden.



Figuur 59: Logger BP bij sterk variërende wind en een belasting van 1000 W

4.2.3. Demand Side Management

Bij de verbruikers proeftafel kan aan DSM gedaan worden. Dit is reeds kort beschreven in 2.2.2. In de smart-grid-opstelling is het mogelijk om vanuit de SCADA-HMI's de lasten te regelen. In de HMI van de verbruiker-proeftafel is het mogelijk om door middel van enkele regelingen limieten op te leggen aan het totale verbruik van de proeftafel. Bij DSM wordt het verbruik van huishoudtoestellen uitgesteld naar latere tijden om de energievraag en het aanbod in evenwicht te houden. Door een limiet op het verbruik in te stellen kan bijvoorbeeld het totale verbruik op het net verminderd worden tijdens piekuren. Wanneer de totale vraag vermindert kunnen deze limieten opgeheven worden. In Figuur 60 zijn de verschillende regelementen die aanwezig zijn voor de verbruikers proeftafel weergegeven. In Tabel 4 zijn de verschillende regelingen van de verbruikers proeftafel samengevat.

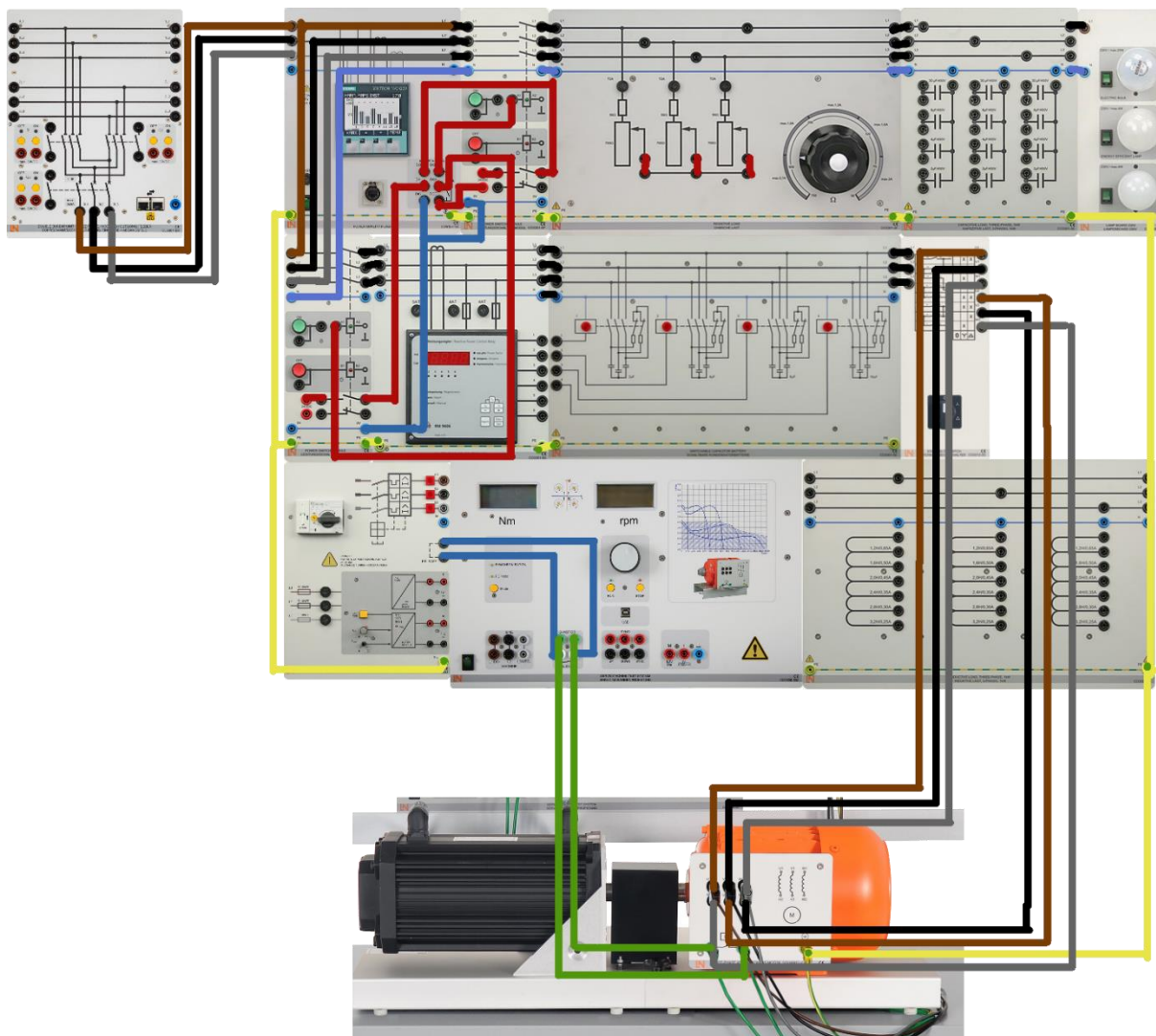


Figuur 60: SCADA-regeling DSM

Tabel 4: Regelingen verbruikers proeftafel

Regelement	Actie van de regeling
Load	Visuele weergave van de dynamische last.
"On" en "Off"	Manuele regeling van de statische en de dynamische last (motor), aan of uit zetten.
Automatic DSM	Automatische regeling van de lasten op basis van ingestelde limietwaarden. ΣP_{min} [W] de onderste limiet, ΣP_{max} [W] de bovenste limiet.
Ramp	Configuratie van de ramp-parameters van de motor. De motor gaat zijn koppel verhogen en verlagen tussen de ingestelde limieten. De tijd van verhogen en verlagen kan ingesteld worden en de tijd dat de motor op zijn maximum en minimum moet draaien kan hier ook ingesteld worden.

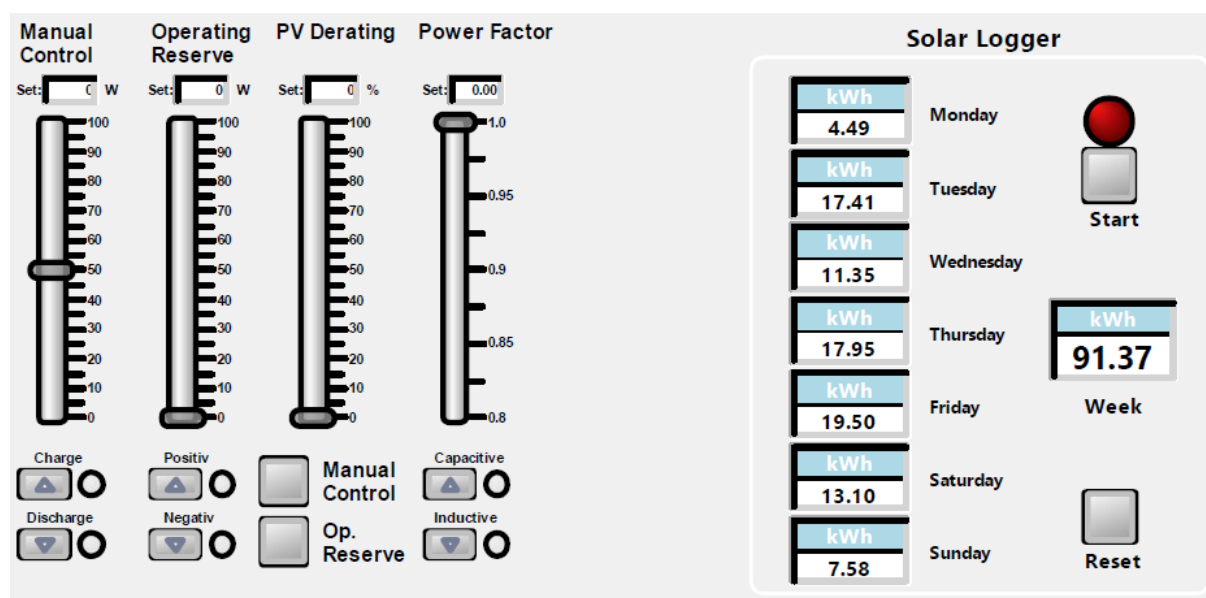
In Figuur 61 is de DSM opstelling van de verbruikers proeftafel te zien. De statische last is voorgesteld door een regelbare weerstand, enkele lampen, spoelen en condensatoren. De dynamische last is de motor die onderaan op de figuur te zien is. Het koppel van de motor kan ingesteld worden met de HMI-regelingen en zal verhogen en verlagen volgens de ingestelde ramp-parameters.



Figuur 61: Verbruikers proefopstelling DSM

4.2.4. Werking batterijopslagsysteem in combinatie met een PV-installatie

Een batterijopslagsysteem kan werken als een reserve energiebron (batterij ontladen en energie leveren), een extra verbruiker (opladen met energie uit het net) of als een buffer (zonne-energie opslaan voor later) om zo de balancing van het net te ondersteunen. In de HMI's zitten verschillende regelingen die de werking van het batterijopslagsysteem en de werking van de PV-installatie kunnen beïnvloeden. In Figuur 62 zijn de verschillende regelementen die aanwezig zijn voor de zonnepark-proeftafel en de batterijopslag-proeftafel weergegeven. In Tabel 5 zijn de verschillende regelingen samengevat. De batterij werkt in drie standen: manuele controle, *operating reserve* en automatische controle.



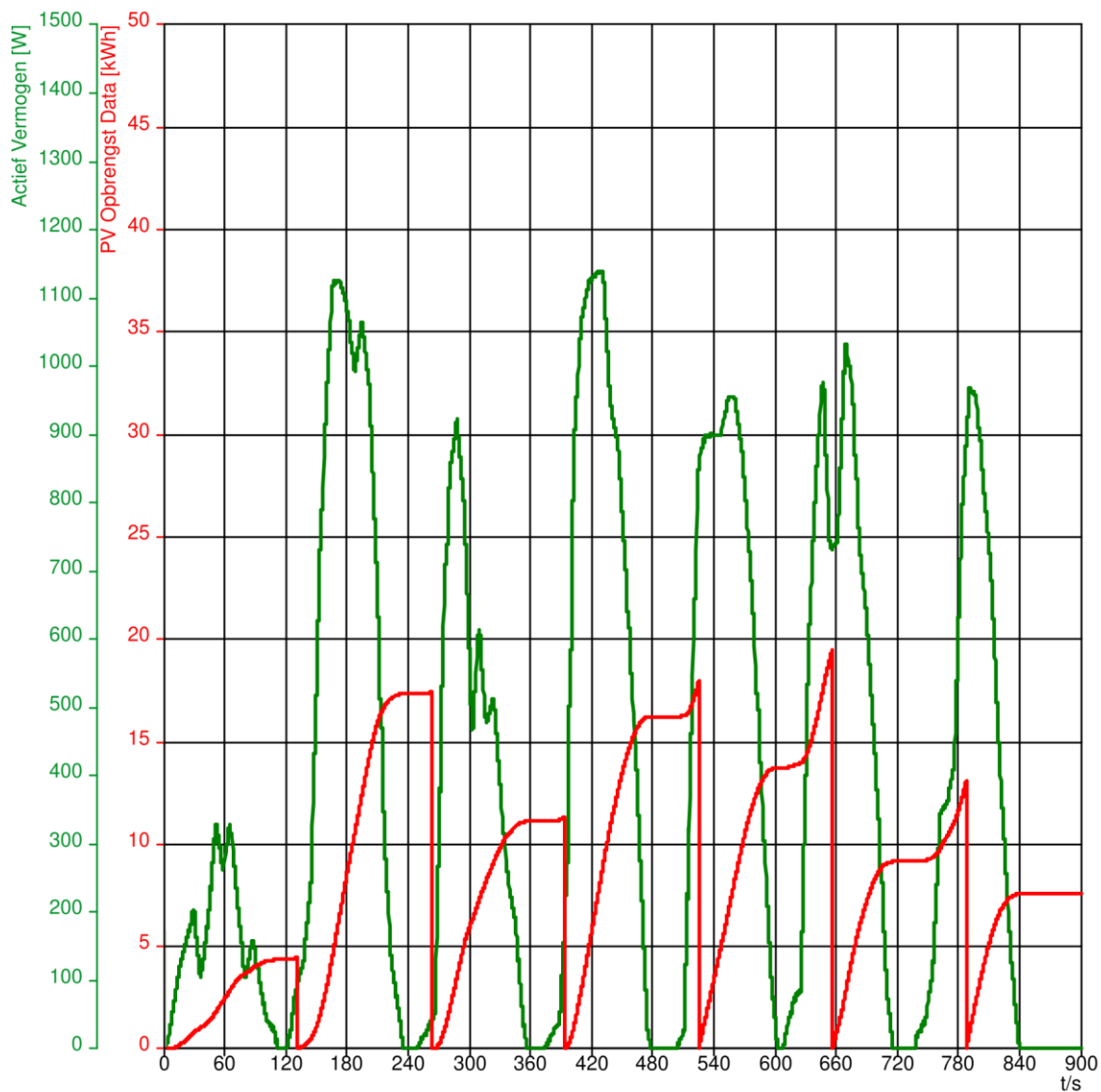
Figuur 62: SCADA-regeling batterijopslagsysteem en PV-installatie

Tabel 5: Regelingen zonnepark met batterijopslag

Regelement	Actie van de regeling
Manual Control	Handmatige bediening van de batterij. Hier kan een vermogen ingesteld worden die de batterij moet opladen of ontladen. Met de knoppen "charge" en "discharge", keuze opladen of ontladen.
Operating reserve	Instellen van het regelvermogen voor het volledige huissysteem (verbruikers, opwekking met de PV-installatie en het batterijopslagsysteem). Afhankelijk van de systeem toestand, kan het ingestelde vermogen niet beschikbaar gesteld worden. "Positive" knop: afname van vermogen van het net door de huisaansluiting. "Negative" knop: injectie van vermogen in het net (regeling door het batterijopslagsysteem).
PV Derating	Instellen van de vermogensvermindering van het vermogen van de PV-installatie, als percentage van het nominale vermogen.
Power Factor	Voorziening van reactief vermogen van de PV-installatie (capacitief of inductief).
Solar logger: start	Starten van de Solar Logger, deze regeling enkel gebruiken wanneer een week profiel gesimuleerd wordt in de zonnepaneel-emulator.
Solar logger: reset	Resetten van de Solar Logger, de opgeslagen waardes gaan verloren.

In automatische controle zal de batterij zijn automatische voorgeprogrammeerde werking uitvoeren, dit zit intern in de batterij ingewerkt. De batterij laadt dan op wanneer er een teveel aan PV-productie is, wanneer de batterij vol is en er een teveel aan productie is, wordt dit teveel in het net geïnjecteerd. Wanneer deze injectie niet nodig is, is het mogelijk om de energieproductie van de PV-installatie te deraten. Hierdoor gaat een deel van de geproduceerde energie verloren maar wordt het net niet belast. Als de huisconnectie van het batterijopslagsysteem energie verbruikt en de PV-installatie wekt niets op, dan ontladde de batterij en levert de batterij de nodige energie.

Met behulp van de *solar logger* is het mogelijk om het productieprofiel van een week vast te leggen. Hiermee kan gekeken worden hoe groot de pieken in vermogen zijn doorheen de week en kan op het einde van de week de totale opbrengst afgelezen worden in de HMI. Deze functie kan enkel gebruikt worden als een weekprofiel gesimuleerd wordt op de zonnepaneel-emulator. Figuur 63 geeft de gelogde weekopbrengst weer. De groene grafiek toont het actief vermogen dat opgewekt wordt door de PV-installatie, de rode grafiek toont de totale opwekking per dag in kWh. De som van deze dagen geeft de totale weekopbrengst, dit kan afgelezen worden in de HMI.



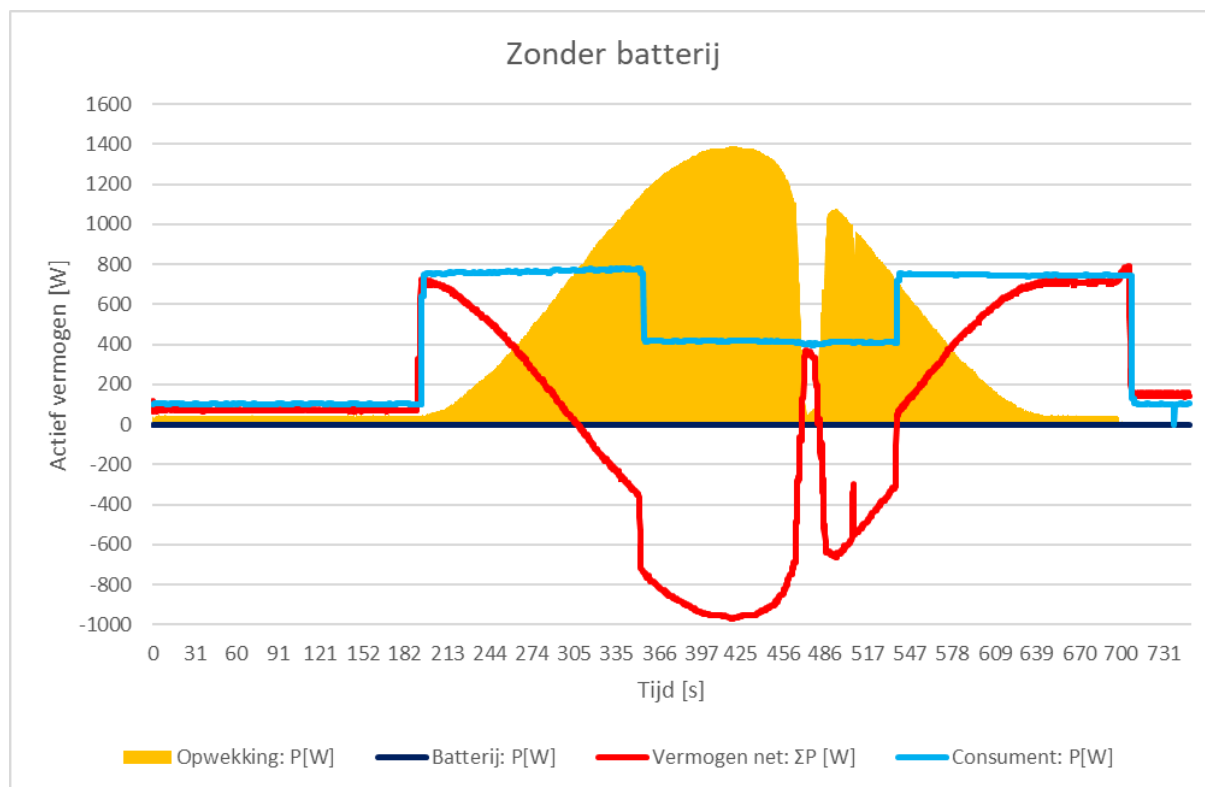
Figuur 63: Opgewekt vermogen PV-installatie in een week

Om de werking van de batterij te onderzoeken, wordt een zomerdag gesimuleerd, de 24 uur van de dag zijn geschaald naar 12 minuten zodat 6 uur overeenkomt met 180 seconden op de logger. De gesimuleerde zomerdag had lokale bewolking omstreeks 16 uur, waardoor er een dip te zien is in de opwekking van de PV-installatie. In dit onderzoek wordt het opgewekte vermogen van PV-installatie, het vermogen van de batterij, het vermogen van de consument en het geïnjecteerde of afgenomen vermogen van het net, gemonitord en gelogd. Het verbruikprofiel van de consument doorheen de dag is zoals hieronder in Tabel 6. Het verbruik van de consument wordt manueel geregeld door te draaien aan een variabele weerstand.

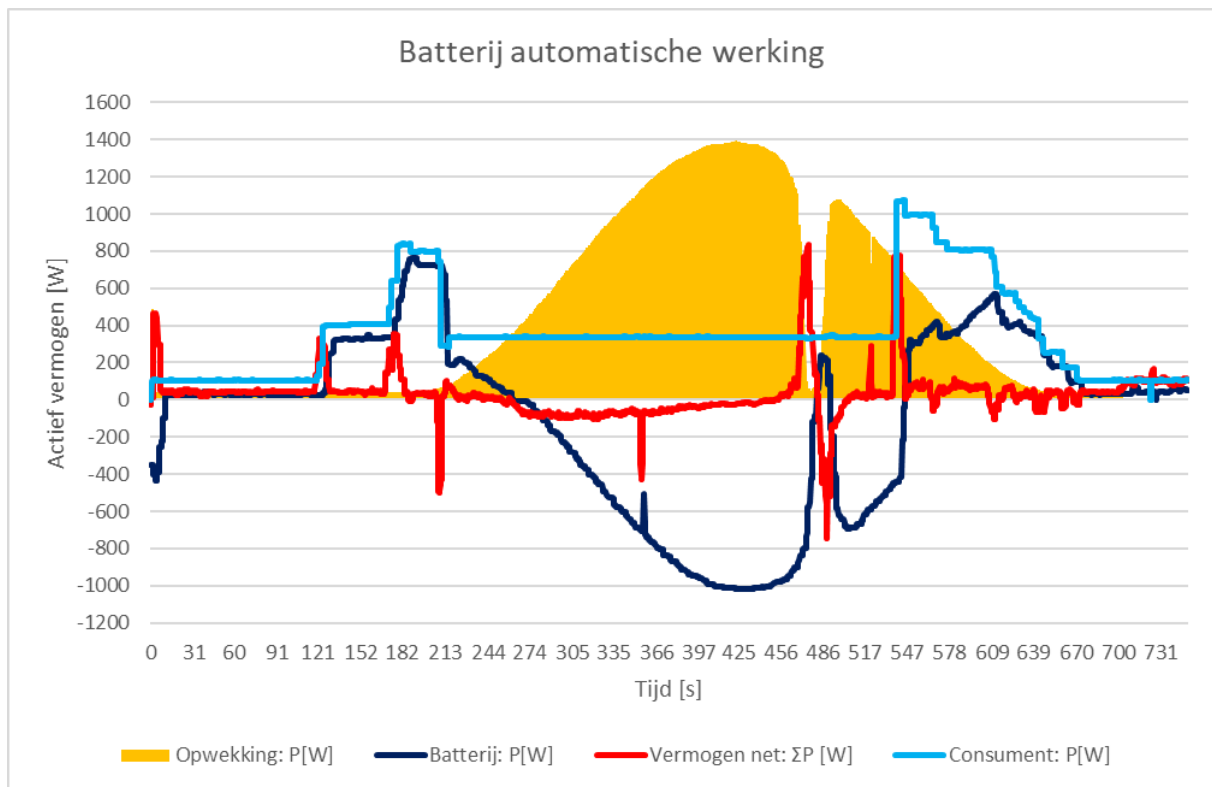
Tabel 6: Verbruikprofiel consument

Van	Tot	Verbruik P [W]
00:00	06:00	100
06:00	13:00	800
13:00	18:00	400
18:00	22:00	800
22:00	00:00	100

Dezelfde dag is gesimuleerd met verschillende regelingen van de batterij. Eerst wordt de zomerdag gesimuleerd zonder de werking van de batterij (Figuur 64). Vervolgens met de batterij in automatische werking (Figuur 65), zoals hierboven beschreven.

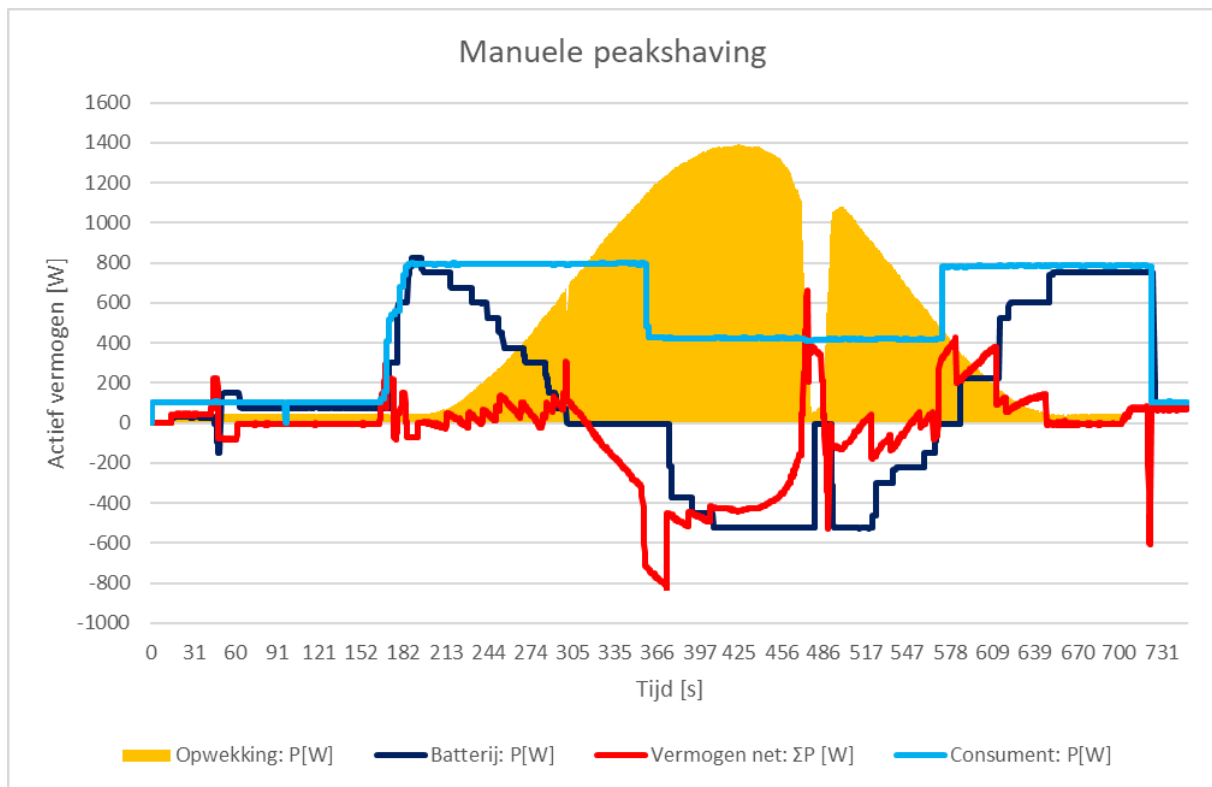


Figuur 64: Simulatie zomerdag zonder batterij



Figuur 65: Simulatie zomerdag met batterij in automatische werking

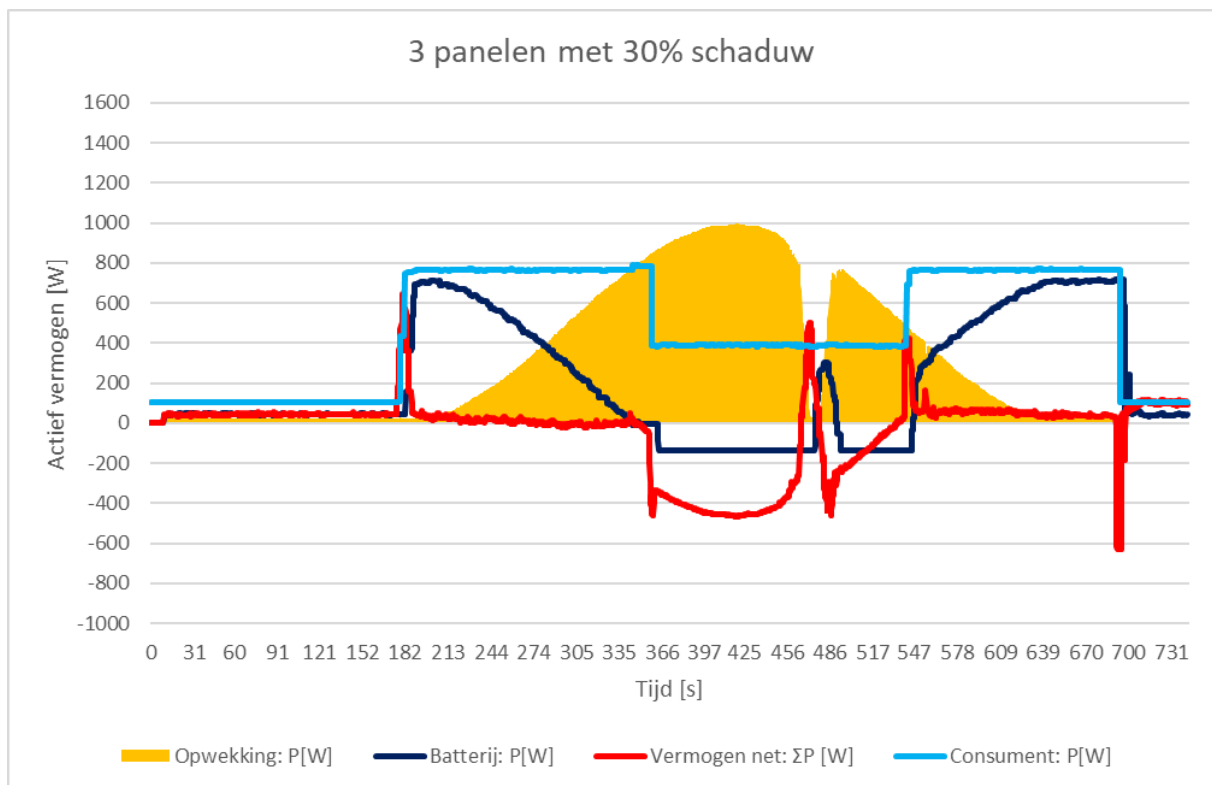
In de figuren hierboven is te zien dat rond de middag van de gesimuleerde dag de opwekking van de PV-installatie het grootste is. Zonder batterij wordt het overschot van de energie geïnjecteerd in het net. In Figuur 65 laadt de batterij gedurende de hele dag op, dit is mogelijk omdat we eigenlijk maar 12 minuten simuleren in plaats van 24 uur. Als we de automatische werking in een werkelijke zomerdag van 24 uur zouden aannemen zou de batterij vol zijn na enkele uren opladen. Waardoor de piek in de productie van de PV-installatie nog steeds geïnjecteerd wordt in het net en onbalans kan veroorzaken. Om deze piek te verminderen kan de batterij het concept van *peak shaving* toepassen. Peak shaving bij batterijen houdt in dat de batterij enkel oplaadt op de momenten wanneer de opwekking het grootste is. In Figuur 66 is peak shaving toegepast door manueel de batterij te controleren en enkel te laten opladen wanneer de opwekking het grootste is, zo wordt het net minder belast en blijft het in evenwicht.



Figuur 66: Simulatie zomerdag met batterij en peak shaving

4.2.5. Impact schaduwvorming op PV-productie

Onverwachte wolken en schaduwvorming hebben een grote impact op de productie van de PV-installaties, waardoor het evenwicht van het net verstoord kan worden. Met behulp van de zonnepaneel-emulator kan schaduw op panelen gesimuleerd worden. Om deze impact te onderzoeken wordt dezelfde zomerdag uit de vorige paragraaf opnieuw gesimuleerd met schaduw op de panelen. De batterij staat in automatische werking. De sterkte van de schaduw kan eveneens aangepast worden. In Figuur 67 is de simulatie uitgevoerd met drie panelen in schaduw en een schaduwsterkte van 30%. Hier is te zien dat door de schaduw de PV-productie verminderd is.



Figuur 67: Simulatie zomerdag met 3 panelen in schaduw, schaduwsterkte 30%

4.3. Spanningsregelingen en beveiligingen in het lokaal smart grid

Er zijn verschillende spanningsregelingen aanwezig in de smart-grid-opstelling. In deze paragraaf worden deze onderzocht. Om de werking van het lokaal smart grid te verzekeren en schade te voorkomen zitten enkele beveiligingen in het lokaal smart grid. Deze worden eveneens hier besproken.

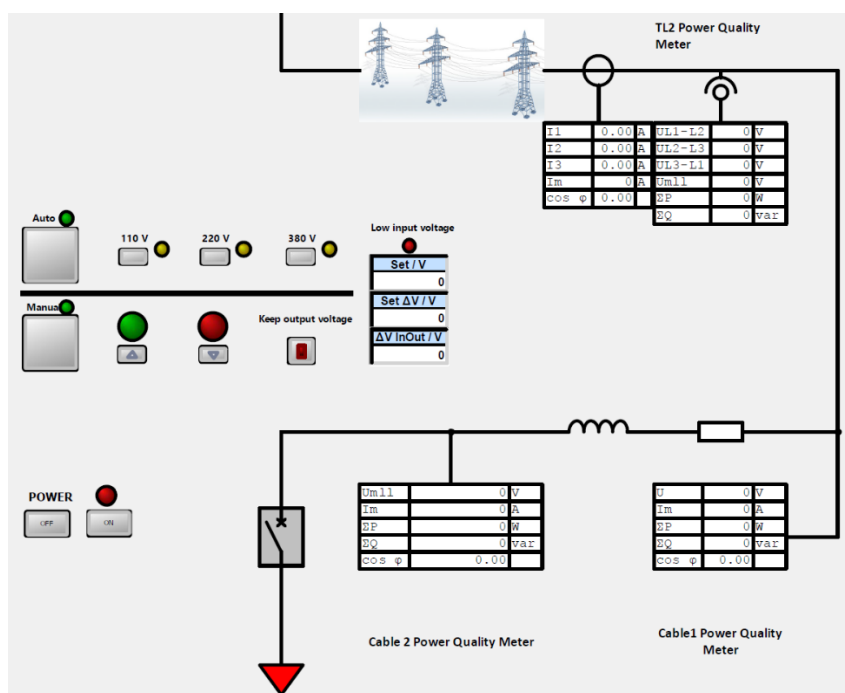
4.3.1. Reactieve vermogensregelingen

Met reactief vermogen kan de spanning geregeld worden. Reactief vermogen is moeilijk te transporteren omdat hoogspanningslijnen zelf reactief vermogen nodig hebben omwille van hun inductieve aard. Als reactief vermogen getransporteerd wordt over een hoogspanningslijn zal de spanning veranderen. Hierdoor moet in de smart-grid-opstelling op verschillende plaatsen het reactief vermogen geregeld kunnen worden zodat de spanning constant blijft.

De regeling van het injecteren en het opnemen van reactief vermogen is reeds besproken in de voorgaande paragraaf. De verschillende productie-eenheden in de smart-grid-opstelling kunnen naast actief vermogen ook reactief vermogen leveren. Deze regelingen gebeuren eveneens in de HMI's. Verder kunnen de belastingen in de smart-grid-opstelling veranderd worden door spoelen en condensatoren toe te voegen aan de resistieve belastingen.

4.3.2. On Load Tap Changer van de HVAC-proeftafel

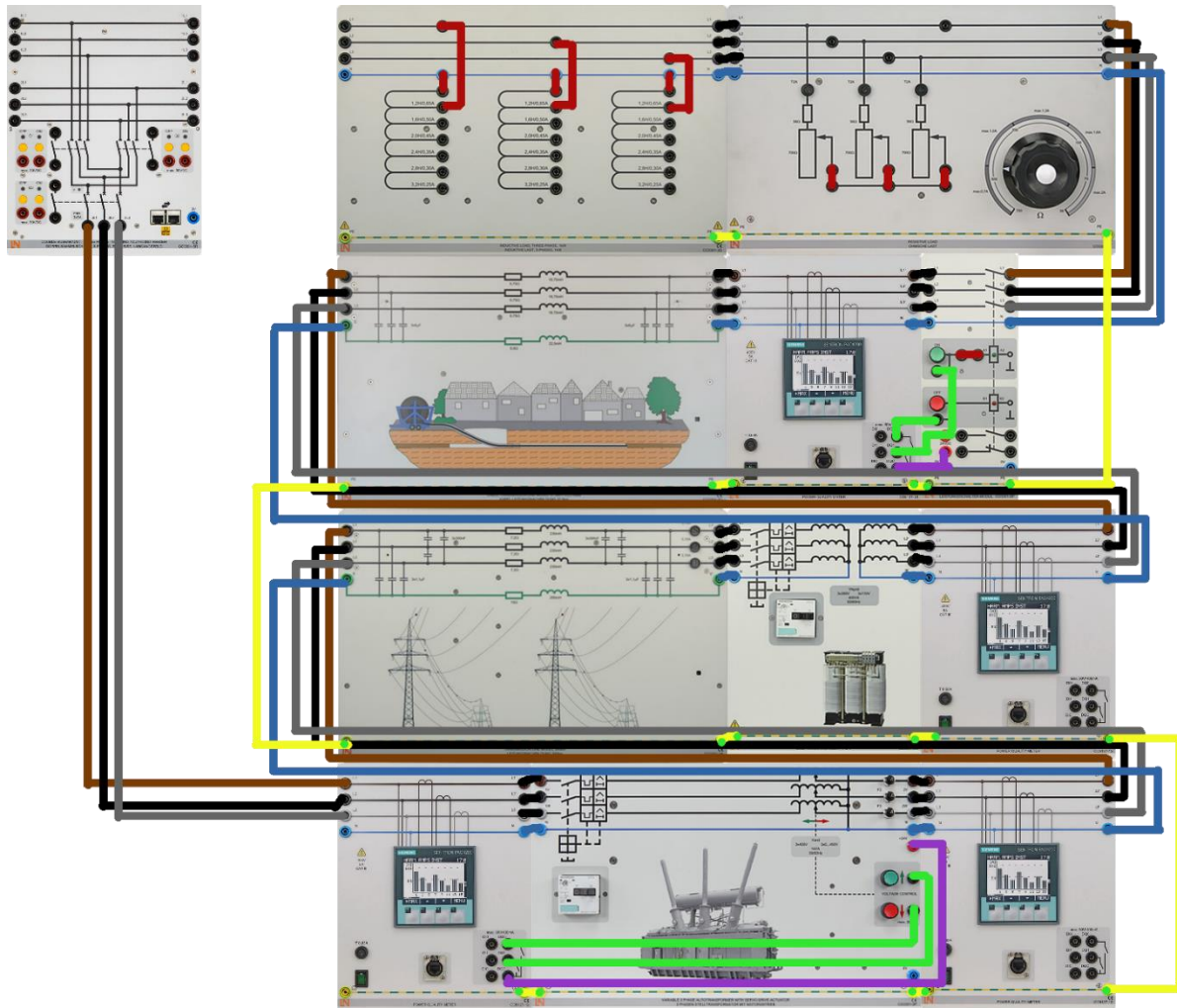
De transformator met variabele tapstand uit de HVAC-proeftafel kan geregeld worden vanuit de hoofd SCADA-HMI van het SGCC. Deze transformator kan het spanningsniveau regelen van de proeftafel. Dit soort transformator is een *On Load Tap Changer* (OLTC). Een OLTC is een speciale transformator die zijn wikkilverhouding kan aanpassen, zonder daarbij de stroom te onderbreken. Aan de ingang van de OLTC is er een koppeling op de busbars. Hier is de spanning dezelfde als de net spanning, namelijk 400 V. Via de regeling in Figuur 68 kan het gewenste spanningsniveau aan de uitgang van de OLTC ingesteld worden.



Figuur 68: OLTC-regeling van de HVAC-proeftafel

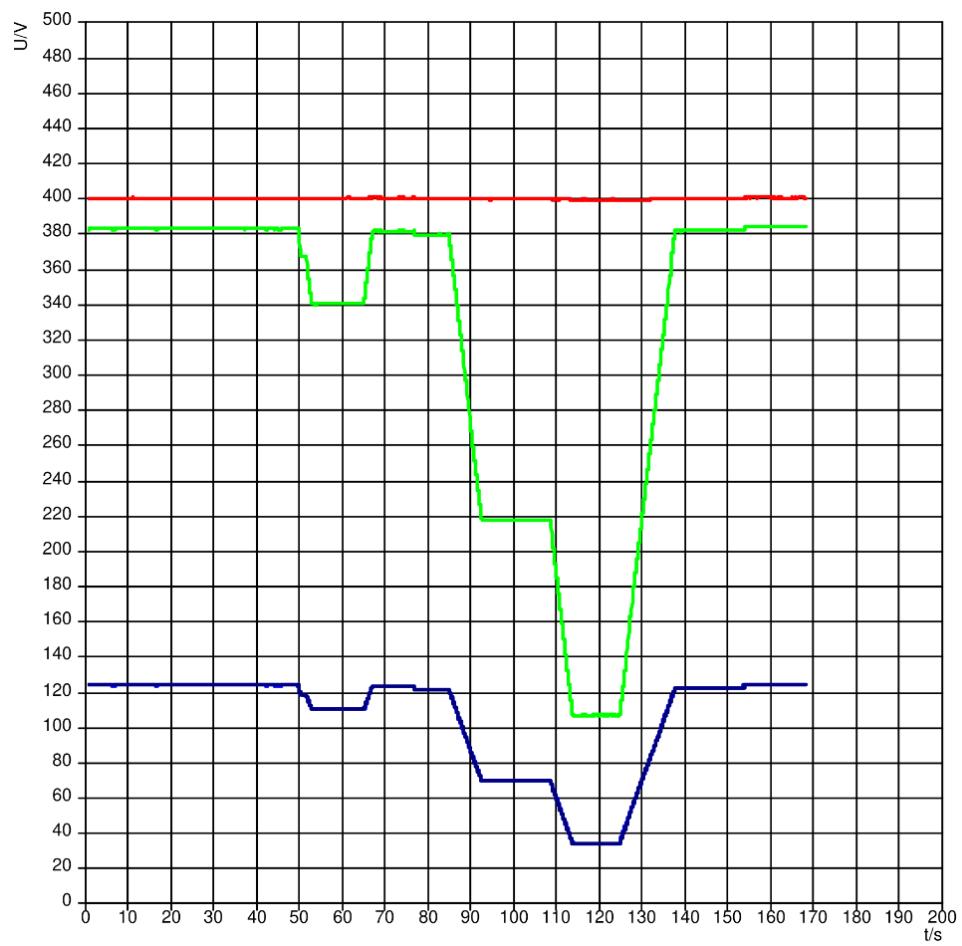
De regeling heeft twee standen: handmatig (manual) of automatische (auto). In de handmatige stand kan de spanning na de OLTC manueel verhoogd of verlaagd worden. Als de knop “Keep output voltage” aan staat zal de PLC-programmatie de OLTC bijregelen zodat de ingestelde waarde constant blijft. Door het inschakelen van inductieve of capacitieve lasten kan de spanning veranderen. In automatische stand regelt de OLTC de spanning naar ofwel 110 V, 220 V of 380 V.

In de proefopstelling wordt de spanning op verschillende punten gemeten (Figuur 69). De proefopstelling bevat naast de OLTC verder nog een hoogspanningslijnmodel, een ondergronds kabelmodel en een transformatorstation (380 V / 110 V). Voor en na deze modellen zal de spanning licht verschillen, dit is omwille van de inductieve aard van de lijn en de kabel.



Figuur 69: OLTC HVAC-proeftafel

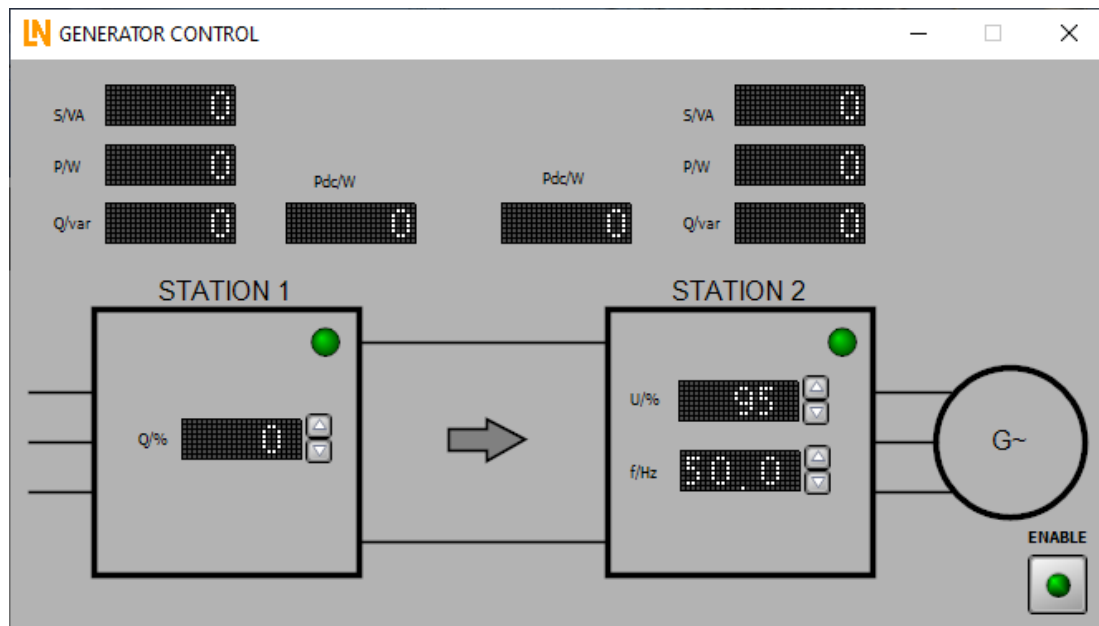
In Figuur 70 is de spanning en het effect van de OLTC gelogd. De rode lijn is de spanning voor de OLTC, de groene lijn is de spanning na de OLTC op het begin van de hoogspanningslijn en de blauwe lijn is de spanning na een transformatorstation (380 V / 110 V) voor de ondergrondse kabel. De werking van de OLTC is af te leiden uit de figuur.



Figuur 70: Logger OLTC-werking

4.3.3. STATCOM HVDC-proeftafel

In de HVDC-proeftafel van de smart-grid-opstelling zijn twee HVDC-omvormerstations aanwezig. Deze regelen de omvorming van wisselstroom naar gelijkstroom en andersom. Over de HVDC-transmissielijn tussen de HVDC-stations wordt de energie met minimale verliezen getransporteerd. Deze HVDC-stations hebben verschillende werkingsstanden, één daarvan is de STATCOM-stand. In deze stand kunnen de omvormerstations het ingaande en uitgaande reactieve vermogen regelen. Hierdoor kan de spanning op het einde van het tweede omvormerstation, aan de kant van de windturbine, geregeld worden. Om het reactief vermogen van de omvormerstations te regelen is een virtueel LabSoft instrument nodig, namelijk de “Generator Control” (Figuur 71). De omvormerstations zijn via USB verbonden. Dit virtueel instrument kan enkel lokaal ingesteld worden via de computer van de HVDC-proeftafel.

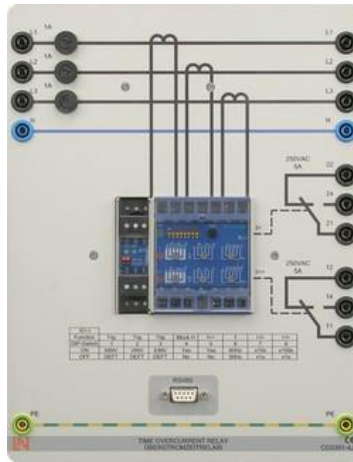


Figuur 71: Generator-controle-regeling

4.3.4. Beveiligingen

In de smart-grid-opstelling zijn twee verschillende soorten beveiligingen aanwezig. Een overstroomrelais en het multifunctioneel relais van de generatoren. Het smart-grid-labo bevat nog een derde relais - de over- en onderspanningsrelais - maar deze is niet geïntegreerd in de labo-opstelling, omdat het multifunctioneel relais dezelfde beveiliging aanbiedt. Door middel van fouten te simuleren is het mogelijk om de werking van deze beveiligingen te testen.

Het overstroomrelais (Figuur 72) beveiligt de apparatuur van de smart-grid-opstelling tegen te hoge stromen. In de smart-grid-opstelling is het overstroomrelais aanwezig tussen de regelbare voeding (het net) en het dubbele busbar-systeem. De busbars kunnen een maximale stroom aan van 5 A, terwijl de regelbare voeding maar zekeringen heeft van 2 A. Om schade te voorkomen aan zekeringen en apparatuur van het smart-grid-labo beschermt de overstroom relais tegen te hoge stromen die langer dan 1 seconden aanwezig zijn. Dit overstroomrelais reageert op de stroom die aanwezig is in het BP. Het relais is ingesteld op een maximale stroom van 1,75 A. Als deze overschreden wordt, stuurt het relais een signaal naar een vermogenschakelaar die de stroom afsluit van het busbar-systeem. Indien de onbalans te groot wordt, stijgt de stroom in het BP. Alle proeftafels verliezen als gevolg hun spanning en op dat moment is er een black-out. Dit moet vermeden worden zodat de componenten van de opstelling niet beschadigd geraken. Het is dus zeer belangrijk dat het evenwicht in het BP stabiel blijft zodat dit overstroomrelais niet activeert.

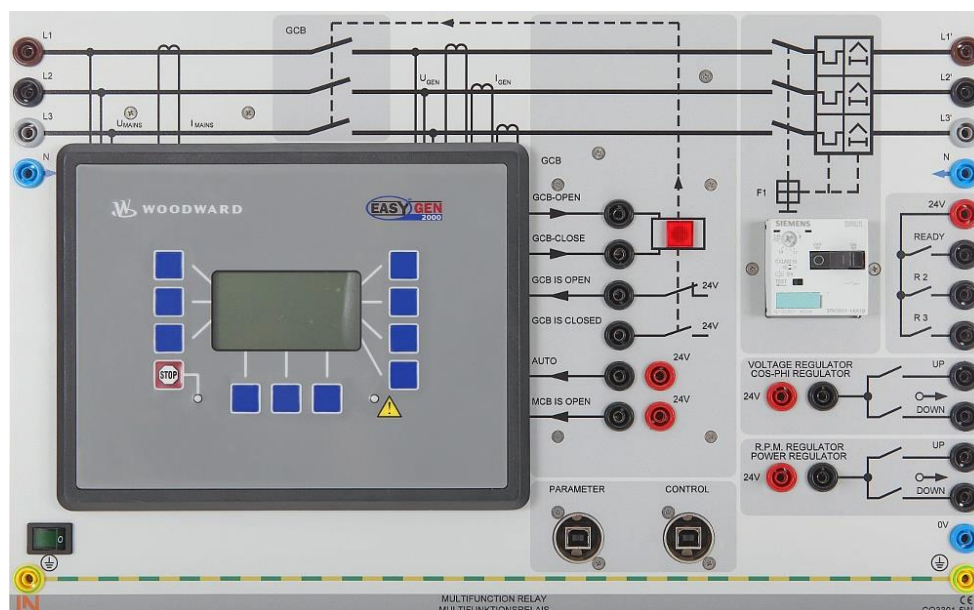


Figuur 72: Overstroomrelais

De tweede beveiliging zit in het multifunctionele relais (Figuur 73) van de generatoren. In dit multifunctioneel relais is het mogelijk om parameters aan te passen en verschillende beveiligingen te activeren. De eerste beveiliging is de over- en onderspanningsbeveiliging. De parameters van deze beveiliging zijn procentueel. Om dit te testen wordt een maximale en een minimale spanning ingesteld. De generator werkt wanneer de spanning tussen deze beide waardes ligt. Wanneer de spanning buiten de grenzen komt, schakelt het multifunctioneel relais de generator uit.

De tweede beveiliging is dezelfde als hierboven, in het multifunctioneel relais is het ook mogelijk om een overstroombeveiliging in te stellen.

De derde beveiliging is de beveiliging tegen omgekeerde stroom. In het multifunctioneel relais kan een percentuele waarde ingesteld worden voor het toelaatbaar omgekeerd vermogen dat de generator mag leveren. De stroomrichting van een generator kan keren als de aandrijving uitgeschakeld wordt of als de aandrijving door een defect uitvalt. Als de stroomrichting omkeert, dan onttrekt de generator stroom aan het net en werkt deze als motor. Als de generator de ingestelde waarde overschrijdt, koppelt het multifunctionele relais deze los van het net.



Figuur 73: Multifunctioneel relais

4.4. Discussie

De smart-grid-opstelling voldoet aan de ontwerpisen. De tien verschillende proeftafels zijn geïntegreerd in de opstelling. De hoofd SCADA-HMI regelt en monitort het complete lokale smart grid. De opstelling en de HMI zijn zo opgebouwd dat het smart-grid-labo optimaal benut wordt en dat in de opstelling de maximale test- en aanstuurmogelijkheden aanwezig zijn om de verschillende proeftafels van de opstelling te besturen.

Gebruik maken van de labo-opstelling en de ontworpen HMI's is het mogelijk om de gewenste scenario's te demonstreren. Voor het eerste scenario, de balancing van het net, kan er op verschillende manieren onbalans in het BP gecreëerd worden. De gebruiker van het lab speelt de rol van de TNB en gebruikt de aanstuurmogelijkheden van de opstelling om deze onbalans te compenseren en zo het evenwicht terug te herstellen. Naast de vermogensregelingen in de opstelling zijn er ook enkele spanningsregelingen in verwerkt. Bijkomend zitten ook enkele beveiligingen in de opstelling die de labo-apparatuur beschermen tegen fouten zoals overstromen en overspanningen.

Door middel van het SCADA-netwerk kan alles in loggers worden weergegeven, wat een grote meerwaarde is in een educatieve context. Naast de besproken resultaten kunnen nog andere onderdelen van de werking van het smart grid onderzocht worden. Zoals bijvoorbeeld de schakelprocedures van het busbar-systeem, of de synchronisatie van generatoren op het net, zowel manueel als automatisch.

De smart-grid-opstelling kan naar wens worden aangepast, de cursisten kunnen de loggers aanpassen of loggers toevoegen en zelf kiezen welke delen van de opstelling ze willen onderzoeken. In de toekomst zou de smart-grid-opstelling nog verder uitgebreid kunnen worden door bijvoorbeeld een extra PLC-programmatie toe te voegen waardoor onderdelen nog verder geautomatiseerd kunnen worden. Een voorbeeld hiervan is een extra werkingsmode voor het batterijopslagsysteem voor de peak shaving. Met de komst van het capaciteitstarief in 2022 zal dit alsmaar belangrijker worden. Het capaciteitstarief wordt aangerekend op basis van het gemiddelde piekvermogen dat verbruikt wordt per maand [51].

5. Conclusie

De vooropgestelde doelstellingen van deze masterproef, meer bepaald het ontwerpen van een smart-grid-opstelling met maximale test- en aanstuurmogelijkheden en het onderzoeken van de meerwaarde van een DT voor het smart-grid-labo van de T2-campus, werden behaald.

Om de eerste doelstelling verder te definiëren, werden ontwerpeisen opgesteld waaraan de smart-grid-opstelling moest voldoen. Het ontwerp voldoet aan deze eisen, de smart-grid-opstelling integreert de volledige labo-infrastructuur. Aan de hand van de tien verschillende proeftafels zijn de belangrijkste aspecten van de werking van het smart grid aangetoond. De verschillende tafels zijn met elkaar verbonden via het SCADA-netwerk. Dit SCADA-netwerk wordt gebruikt door de ontworpen HMI's om gegevens met elkaar uit te wisselen. Deze gegevens worden dan weer gebruikt in de PLC-programma's om de verschillende regelingen te realiseren. Met behulp van de hardwarecomponenten en de HMI's met de software-PLC's, kunnen de scenario's van de balancing van het net en de spanningsregelingen in een smart grid onderzocht worden. De HMI's bevatten de maximale test- en aanstuurmogelijkheden die het opleidingssysteem van LN te bieden heeft.

Aan de hand van de smart-grid-opstelling kan T2-campus op een didactische manier het inzicht in de werking van smart grids meegeven aan haar cursisten. De inventaris van de labo-infrastructuur vormt voor T2-campus een uitgebreide catalogus. Deze catalogus kan T2 beschikbaar stellen aan potentieel geïnteresseerde bedrijven of onderwijsinstellingen. Op basis van de in deze masterproef gegenereerde inventaris en de smart-grid-opstelling met de maximale test- en aanstuurmogelijkheden kunnen er aangepaste cursussen samengesteld worden, en kan het lab verhuurd worden.

Voor de tweede doelstelling is op basis van een literatuurstudie, een onderbouwde analyse uitgevoerd naar de meerwaarde van een DT voor het smart-grid-labo. Uit de literatuurstudie valt te concluderen dat de voordelen die een DT heeft voor smart-grid-systemen niet van toepassing zijn op het smart-grid-labo. Dit is te wijten aan een verschil in doelstellingen, DT's worden voornamelijk gebruikt voor de optimalisatie van systemen. In het smart-grid-labo moet niets geoptimaliseerd worden, de doelstelling van het lab is louter educatief.

Uit het literatuuronderzoek in deze masterproef is gebleken dat de implementatie van een DT geen meerwaarde zou zijn voor de werking van het labo. Het kan enkel in een educatieve context als een standalone didactisch onderwerp dienen. Vervolgens werd er gekeken naar alternatieven zoals HIL-simulaties. Hier is gebleken dat het mogelijk is om het LN-opleidingssysteem uit te breiden met de OPAL-RT RTS-module, waarvan de compatibiliteit gegarandeerd is. Met behulp van zo een HIL-systeem kunnen de scenario's gedetailleerder onderzocht worden in de smart-grid-opstelling. Dit zou wel degelijk een meerwaarde kunnen betekenen voor T2-campus. Een ander alternatief is om gewone software-simulaties te ontwerpen om de werking van het smart grid te demonstreren en onderzoeken. Aan de hand van deze simulaties kan T2-campus het smart-grid-labo als flipped-classroom gebruiken. Echter, door deze simulaties gaat het initieel doel verloren om hands-on interactief de werking van smart grids te onderzoeken.

Voor zowel DT's, als HIL-simulaties en gewone software-simulaties is de juiste software nodig, zoals MATLAB en Simulink. Deze software heeft echter dure licenties. Bijkomend voor HIL-simulaties, moet T2-campus investeren in de OPAL-RT RTS-module.

Ten slotte biedt de ontworpen smart-grid-opstelling nog de flexibiliteit om loggers aan te passen of nieuwe loggers aan te maken in functie van welke delen van de opstelling men wil onderzoeken. De smart-grid-opstelling zou in de toekomst nog verder geautomatiseerd kunnen worden door extra PLC-programmatie toe te voegen.

Referentielijst

- [1] “Partners - T2 Campus”. [Online]. Beschikbaar op: <https://t2-campus.be/over-t2-campus/partners/>. [Geraadpleegd: 02-mei-2021].
- [2] “Lucas Nülle - Software SCADA for Power Engineering, designer software”. [Online]. Beschikbaar op: <http://www.lucas-nuelle.us/2776/pid/11796/apg/6198/Software-SCADA-for-Power-Engineering,-designer-software.htm>. [Geraadpleegd: 01-nov-2020].
- [3] “Microgrid Digital Twins and IoT”. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.crom.et.aau.dk/microgrid-digital-twins-and-iot/>. [Geraadpleegd: 01-nov-2020].
- [4] “Smart grids - CEN-CENELEC”. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.cenelec.eu/standards/Sectorsold/SustainableEnergy/SmartGrids/Pages/default.aspx>. [Geraadpleegd: 08-dec-2020].
- [5] “ETSI - Smart Grid Networks | Smart Grid System - Smart Grid Standards”. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.etsi.org/technologies/smart-grids>. [Geraadpleegd: 08-dec-2020].
- [6] NIST, “NIST Special Publication 1108R2 NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards , NIST Special Publication 1108R2 NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards”, *Nist Spec. Publ.*, pp. 1–90, 2012.
- [7] X. Yu en Y. Xue, “Smart Grids: A Cyber-Physical Systems Perspective”, *Proc. IEEE*, vol. 104, nr. 5, pp. 1058–1070, 2016.
- [8] FOD Economie, “FOD Economie”, 2014. [Online]. Beschikbaar op: <https://economie.fgov.be/nl/themas/online/telecommunicatie/smart-grid>. [Geraadpleegd: 03-mei-2021].
- [9] T. U. Daim, T. Oliver, en R. Phaal, “Technology roadmapping”, *Technol. Roadmapping*, pp. 1–783, 2018.
- [10] IEA, “How2Guidefor: Smart Grids in Distribution Networks - Roadmap and Implementation”, *Int. Energy Agency*, pp. 1–60, 2015.
- [11] K. Sayed en H. A. Gabbar, *Scada and smart energy grid control automation*. Elsevier Inc., 2017.
- [12] Green European Foundation, European Renewable Energies Federation, Friends of the Earth Europe, en Heinrich Böll, “Energy Atlas 2018”, *Green Eur. Found. Eur. Renew. Energies Fed. Friends Earth Eur. Heinrich Böll*, p. 33, 2018.
- [13] M. Usler *e.a.*, “Applying the smart grid architecture model for designing and validating system-of-systems in the power and energy domain: A European perspective”, *Energies*, vol. 12, nr. 2, 2019.
- [14] J. Bruinenberg *e.a.*, “CEN -CENELEC - ETSI: Smart Grid Coordination Group - Smart Grid Reference Architecture Report 2.0”, nr. November, 2012.
- [15] A. Ghosal, “Key Management Systems for Smart Grid Advanced Metering Infrastructure : A Survey”, vol. 21, nr. 3, pp. 2831–2848, 2019.
- [16] “Reports on Demand Response and Advanced Metering | Federal Energy Regulatory Commission”. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.ferc.gov/industries-data/electric/power-sales-and-markets/demand-response/reports-demand-response-and>. [Geraadpleegd: 10-dec-2020].

- [17] “2030 climate & energy framework | Climate Action”. [Online]. Beschikbaar op: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en. [Geraadpleegd: 03-mei-2021].
- [18] “2050 long-term strategy | Climate Action”. [Online]. Beschikbaar op: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en. [Geraadpleegd: 03-mei-2021].
- [19] M. L. Tuballa en M. L. Abundo, “A review of the development of Smart Grid technologies”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 710–725, 2016.
- [20] S. S. Reka en T. Dragicevic, “Future effectual role of energy delivery: A comprehensive review of Internet of Things and smart grid”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, nr. June 2017, pp. 90–108, 2018.
- [21] “The Efficacy and Challenges of SCADA and Smart Grid Integration | CSIAC”. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.csiac.org/journal-article/the-efficacy-and-challenges-of-scada-and-smart-grid-integration/>. [Geraadpleegd: 05-mei-2021].
- [22] N. Arghira, D. Hossu, I. Făgărășan, S. S. Iliescu, en D. R. Costianu, “Modern scada philosophy in power system operation - A survey”, *UPB Sci. Bull. Ser. C Electr. Eng.*, vol. 73, nr. 2, pp. 153–166, 2011.
- [23] M. Dr. Grieves, “Digital Twin : Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication This paper introduces the concept of a A Whitepaper by Dr . Michael Grieves”, *White Pap.*, nr. March, 2015.
- [24] M. Atalay en P. Angin, “A Digital Twins Approach to Smart Grid Security Testing and Standardization”, *2020 IEEE Int. Work. Metrol. Ind. 4.0 IoT, MetroInd 4.0 IoT 2020 - Proc.*, pp. 435–440, 2020.
- [25] W. Danilczyk, Y. Sun, en H. He, “ANGEL: An Intelligent Digital Twin Framework for Microgrid Security”, *51st North Am. Power Symp. NAPS 2019*, 2019.
- [26] “What Is a Digital Twin? - MATLAB & Simulink”. [Online]. Beschikbaar op: <https://nl.mathworks.com/discovery/digital-twin.html>. [Geraadpleegd: 06-mei-2021].
- [27] “Digital Twin | Siemens Digital Industries Software”. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/digital-twin/24465>. [Geraadpleegd: 06-mei-2021].
- [28] P. T. Baboli, D. Babazadeh, en D. R. Kumara Bowatte, “Measurement-based Modeling of Smart Grid Dynamics: A Digital Twin Approach”, *2020 10th Smart Grid Conf. SGC 2020*, nr. Cim, 2020.
- [29] C. Brosinsky, D. Westermann, en R. Krebs, “Recent and prospective developments in power system control centers: Adapting the digital twin technology for application in power system control centers”, *2018 IEEE Int. Energy Conf. ENERGYCON 2018*, pp. 1–6, 2018.
- [30] H. Pan, Z. Dou, Y. Cai, W. Li, X. Lei, en D. Han, “Digital Twin and Its Application in Power System”, *2020 5th Int. Conf. Power Renew. Energy, ICPRE 2020*, pp. 21–26, 2020.
- [31] A. Kummerow, S. Nicolai, C. Brosinsky, D. Westermann, A. Naumann, en M. Richter, “Digital-Twin based Services for advanced Monitoring and Control of future power systems”, pp. 1–5, 2021.
- [32] C. Brosinsky, X. Song, en D. Westermann, “Digital Twin – Concept of a Continuously Adaptive Power System Mirror”, *2019 Int. ETG-Congress*, pp. 147–152, 2019.
- [33] M. Li, Y. Ma, Z. Yin, en C. Wang, “Structural Design of Digital Twin Laboratory Model Based on Instruments Sharing Platform”, *Proc. 32nd Chinese Control Decis. Conf. CCDC 2020*, nr. 2017, pp. 797–802, 2020.

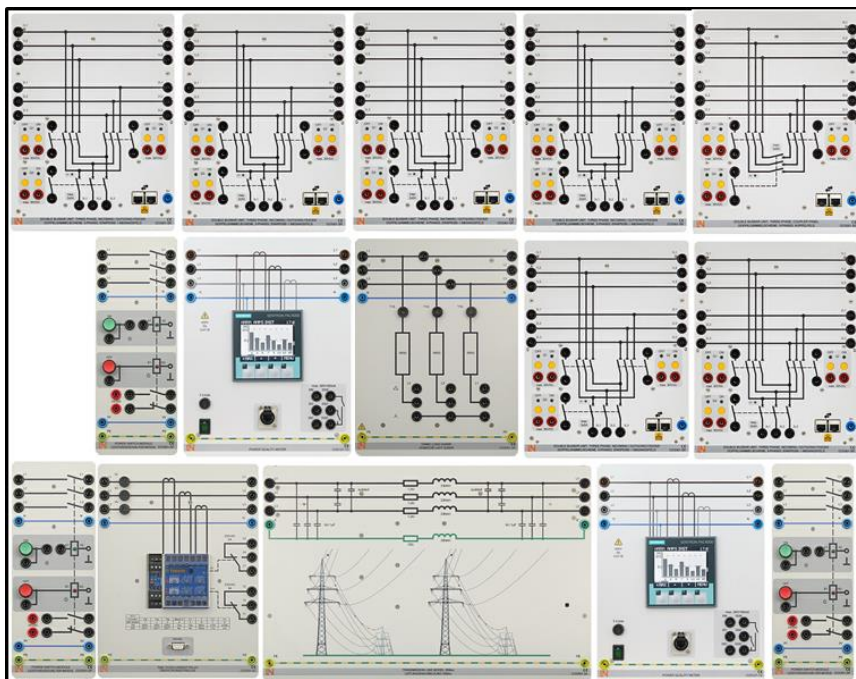
- [34] T. I. Strasser en E. C. W. De Jong, *European Guide to Power System Testing*. 2020.
- [35] R. Isermann, J. Schaffnit, en S. Sinsel, “Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine-control systems”, *Control Eng. Pract.*, vol. 7, nr. 5, pp. 643–653, 1999.
- [36] “Basics of Hardware-In-The-Loop simulation - MATLAB & Simulink - MathWorks Benelux”. [Online]. Beschikbaar op: <https://nl.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/what-is-hardware-in-the-loop-simulation.html>. [Geraadpleegd: 06-mei-2021].
- [37] J. H. Jeon *e.a.*, “Development of hardware in-the-loop simulation system for testing operation and control functions of microgrid”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, nr. 12, pp. 2919–2929, 2010.
- [38] MathWorks, “Hardware-in-the-Loop Testing for Power Electronics”, 2019.
- [39] B. Lundstrom, S. Chakraborty, G. Lauss, R. Brundlinger, en R. Conklin, “Evaluation of system-integrated smart grid devices using software- and hardware-in-the-loop”, *2016 IEEE Power Energy Soc. Innov. Smart Grid Technol. Conf. ISGT 2016*, 2016.
- [40] “OP1420 Microgrid PHIL Test Bench - OPAL-RT”. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.opal-rt.com/op1420-microgrid-phil-test-bench/>. [Geraadpleegd: 08-mei-2021].
- [41] “Lucas Nülle - OPAL-RT Simulations”. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.lucas-nuelle.us/2808n1290>. [Geraadpleegd: 08-mei-2021].
- [42] Lucas-Nülle, “Training Systems for Electrical Power Engineering”, *Catalog*, vol. 6, 2020.
- [43] Elia, “Study on the future design of the ancillary service of voltage and reactive power control”, p. 65, 2018.
- [44] Elia, “Methodology for the dimensioning of the aFRR needs”, pp. 1–80, 2020.
- [45] “AEMO | Energy Explained: Frequency”. [Online]. Beschikbaar op: <https://aemo.com.au/learn/energy-explained/energy-101/energy-explained-frequency>. [Geraadpleegd: 21-mei-2021].
- [46] Elia, “Regels voor de compensatie van kwartieronevenwichten”, pp. 1–28, 2020.
- [47] A. Dexters, “Energiebeheersystemen: Balancing & Frequentieregeling”. Diepenbeek, Belgium, 2020.
- [48] “De rol van de BRP”. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.elia.be/nl/elektriciteitsmarkt-en-systeem/de-rol-van-de-brp>. [Geraadpleegd: 21-mei-2021].
- [49] “De spanningsstabiliteit garanderen”. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.elia.be/nl/elektriciteitsmarkt-en-systeem/systeemdiensten/de-spanningsstabiliteit-garanderen>. [Geraadpleegd: 22-mei-2021].
- [50] ABB, “Technical Application Papers No.13 Wind power plants”, nr. 13, p. 136, 2011.
- [51] “Wat verandert er? | VREG”. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.vreg.be/nl/wat-verandert-er>. [Geraadpleegd: 23-mei-2021].

Bijlagen

Bijlage A: Proeftafels.....	99
A1 Smart Grid Control Center	99
A2Energiecentrale/waterkrachtcentrale	100
A3Windturbinepark.....	101
A4Zonnepark	102
A5Batterijopslag	103
A6HVDC	104
A7HVAC.....	105
A8Transformatoren	106
A9Verbruikers (R, L, C)	107
Bijlage B: Componenten van de labo-infrastructuur	109
Bijlage C: SCADA-HMI's van de smart-grid-opstelling.....	127
C1 Hoofd HMI van het SGCC.....	127
C2HMI van de gascentrale	128
C3HMI van de waterkrachtcentrale	128
C4HMI van het zonnepark en de batterijopslag.....	129
C5HMI van de verbruiker-proeftafel.....	129

Bijlage A: Proeftafels

A1 Smart Grid Control Center



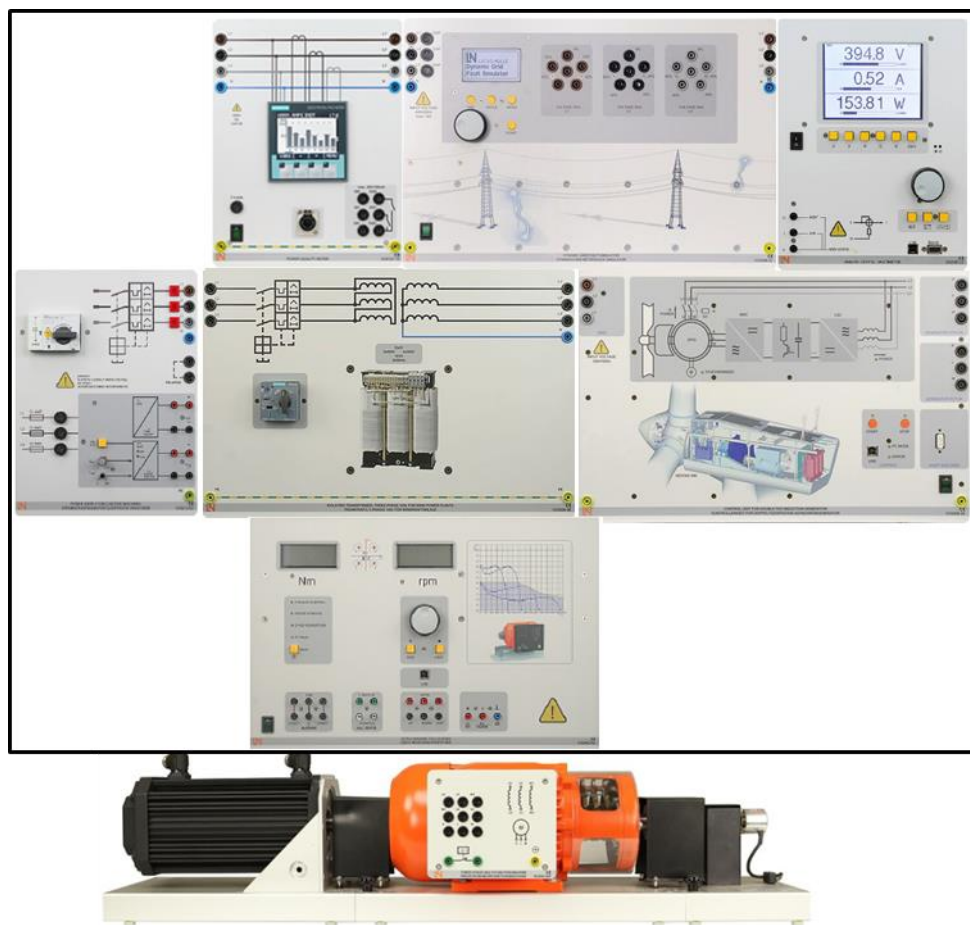
Proeftafel:		Smart Grid Control Center	
Omschrijving:		Deze apparatuur vormt de kern van een "smart grid" in een laboratorium voor energieopwekking. Naast de opwekking, transmissie en distributie van energie registreert de SCADA-software alle relevante waarden en zorgt voor de nodige schakelhandelingen. Dit kan handmatig gebeuren of automatisch door middel van een softwarematig PLC-systeem.	
Onderdelen			
Artikel nummer	Omschrijving	Aantal	
CO3301-3Z	Regelbare 3-fasige voeding, 0-450V/2A	1	
CO3301-5R	Dubbele busbar unit, 3-fasig, inkomende/uitgaande voeding	6	
CO3301-5S	Dubbele busbar unit, 3-fasig, koppelpaneel	1	
CO3301-3A	Transmissielijn model 150km/300km	1	
CO3301-4J	Tijd-overstroom relais	1	
CO3301-3H	Ohmse weerstand 3x 560 Ω	1	
CO3301-5P	Vermogensschakelaar-module	3	
CO5127-1S	3-fasige Power quality meter (slimme meter), display en lange termijn geheugen	2	

A2 Energiecentrale/waterkrachtcentrale



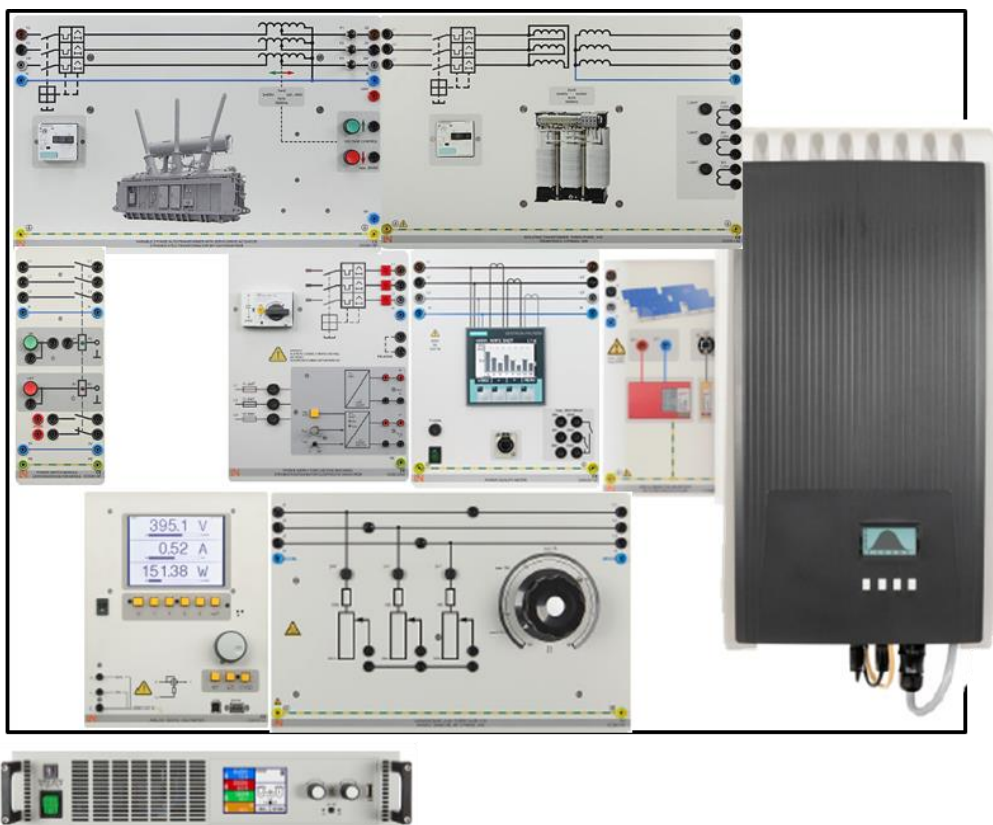
Proeftafel: Energiecentrale/Waterkracht centrale (PHS)		
Omschrijving Energiecentrale:	Elektrisch vermogen wordt voornamelijk opgewekt door driefasengeneratoren. Dit geldt zowel voor conventionele stoomturbine- en waterkrachtcentrales als voor kracht- en windgeneratoren. Naast de basisexperimenten met driefasige synchrone generatoren hebben de experimenten op dit gebied ook betrekking op handbediende en automatische synchronisatiecircuits, alsmede automatische vermogensfactorregeling (cos-phi-regeling) en vermogensregeling. Deze module kan daarom gebruikt worden om zowel de werking van elektriciteitscentrales op het net als daarbuiten (off-grid) te simuleren. Bovendien moeten generatoren doeltreffend worden beschermd tegen interne en externe storingen. de inzet van een verscheidenheid aan beveiligingsapparatuur is hiervoor een vereiste.	
Omschrijving Waterkracht centrale:	In de module waterkracht centrale/pompaccumulatiecentrale wordt geanalyseerd hoe elektrische energie kan worden opgeslagen door deze om te zetten in potentiële energie van water en vervolgens weer om te zetten in elektrische energie voor voeding aan het net. Pompaccumulatiecentrales worden steeds noodzakelijker door de toename van de opwekking van hernieuwbare energie en bieden ook onmisbare energieopslagcapaciteit in een hoogwaardig smart-grid.	
Onderdelen		
Artikel nummer	Omschrijving	Aantal
CO3301-5L	HMI (Human Machine Interface) voor generatoren	1
CO3212-6V	Synchronisatie-eenheid	1
CO3301-5W	Multifunctioneel relais, vermogensregelaar, cos-phi regelaar, synchronisatie-eenheid	1
CO3301-5P	Vermogensschakelaar-module	1
CO3301-3F	Variabele ohmse weerstand, 3-fasig, 1kW	1
CO3301-3D	Inductieve belasting, 3-fasig, 1kW	1
CO3301-5G	Excitatie spanningregelaar met de-excitatie (ontkoppeling van net bij fout)	1
CO3212-1P	Motorbeveiligingsschakelaar, 3 polig, 1,8-2,5A	1
CO3212-5U	3-fasige stroomvoorziening voor elektrische machines	1
CO5127-1S	3-fasige Power quality meter (slimme meter), display en lange termijn geheugen	1
CO3636-6W	Servomachine testopstelling voor 1kW machines	1
CO3636-6U		
SE2682-5Q	3-fasige synchrone machine met smooth-kern rotor, 1kW	1
SE2662-6A	Rubberen koppelingsbus, 1kW	1
SE2662-6B	Koppelingsbescherming, 1kW	1
SE2662-6C	Asbeschermer, 1kW	1

A3 Windturbinepark



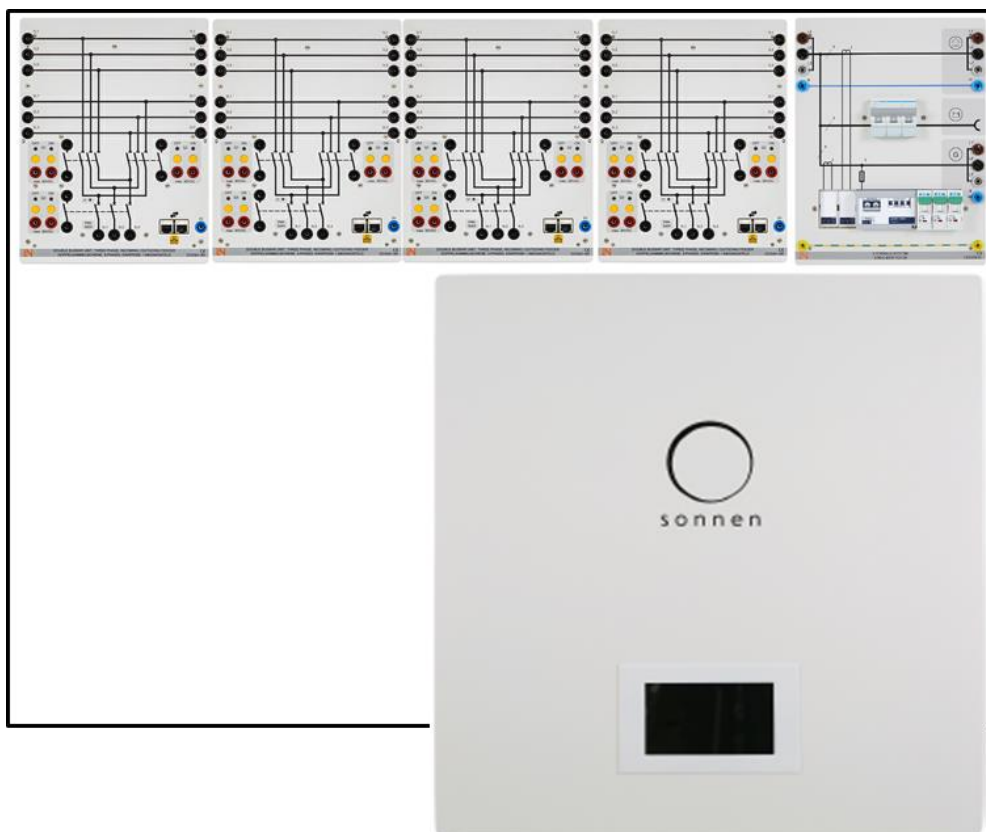
Proeftafel: Wind turbine park		
Omschrijving:		
	Deze proefopstelling is ontworpen voor het onderzoeken van moderne windkrachtcentrales met dubbel gevoede inductiegeneratoren. De wind kan op realistische wijze gesimuleerd worden met behulp van een servomachine-testopstelling en "WindSim"-software. Een moderne windturbine moet kunnen reageren op storingen in het elektriciteitsnet, fault ride-through genoemd. De proefopstelling bevat een dynamische netstoringssimulator die dergelijke storingen nabootst.	
Onderdelen		
Artikel nummer	Omschrijving	Aantal
CO3208-3A	Controle-eenheid voor windturbine, dubbel gevoede asynchrone generator	1
CO3208-3B	3-fasige scheidingstransformator, 1kW voor windkrachtcentrales	1
CO3208-3C	Dynamische netstoringssimulator	1
CO3212-5U	3-fasige stroomvoorziening voor elektrische machines	1
CO5127-1S	3-fasige Power quality meter (slimme meter), display en lange termijn geheugen	1
CO5127-1Z	Analoog/digitale multimeter	1
CO3636-6W	Servomachine testopstelling voor 1kW machines	1
CO3636-6U		
SE2682-6W	3-fasige multifunctionele machine, 1,0 kW	1
SE2682-5T	Incrementele positie-encoder 1024 pulsen	1
SE2662-6A	Rubberen koppelingsbus, 1kW	2
SE2662-6B	Koppelasbescherming, 1kW	2

A4 Zonnepark



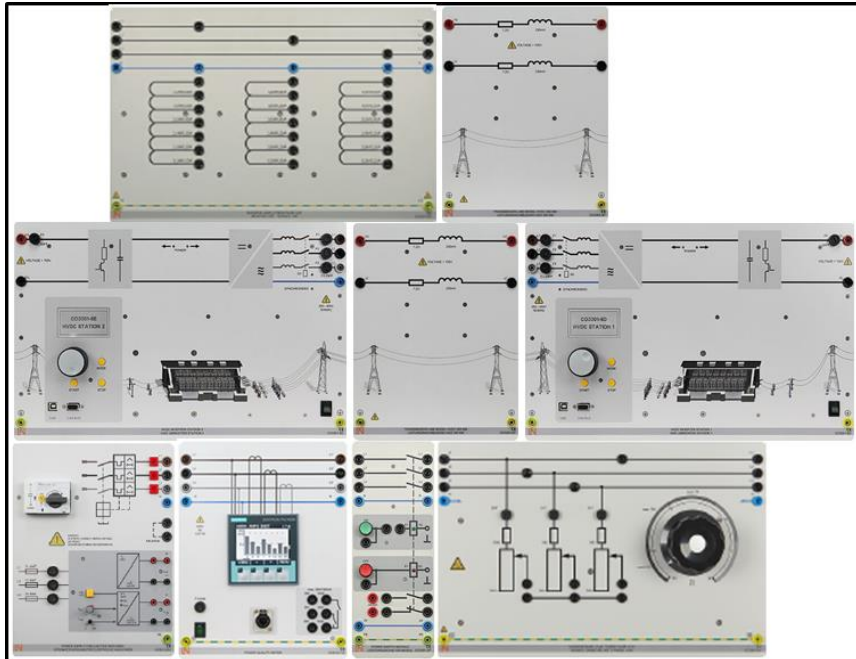
Proeftafel:		Zonnepark
Omschrijving:	Met deze proefopstelling kan de doorgang van de zon op realistische wijze worden gesimuleerd. Dit maakt het mogelijk om experimenten in het labo uit te voeren zonder dat de zon zelf nodig is. Het ontwerp van fotonvoltaïsche systemen die parallel met het elektriciteitsnet werken is realistisch. Om het elektriciteitsnet te stabiliseren worden de technieken van derating van de vermogensomvormer en regelbare lokale transformatoren gebruikt.	
	Onderdelen	
Artikel nummer	Omschrijving	aantal
CO3208-1P	Zonnepaneelemulator, 1,5kW, 500V	1
CO3208-1N	3-fasige industriële fotonvoltaïsche omvormer (netgekoppelde inverter)	1
CO3301-3N	Scheidingstransformator, 3-fasig, 1kW	1
CO3301-3P	3-fasige variabele auto-transformator met motoraandrijving	1
CO5127-1Z	Analoog/digitale multimeter	1
CO3301-3F	Variabele ohmse weerstand, 3-fasig, 1kW	1
CO3212-5U	3-fasige stroomvoorziening voor elektrische machines	1
CO5127-1S	3-fasige Power quality meter (slimme meter), display en lange termijn geheugen	1
CO3301-5P	Vermogensschakelaar-module	1

A5 Batterijopslag



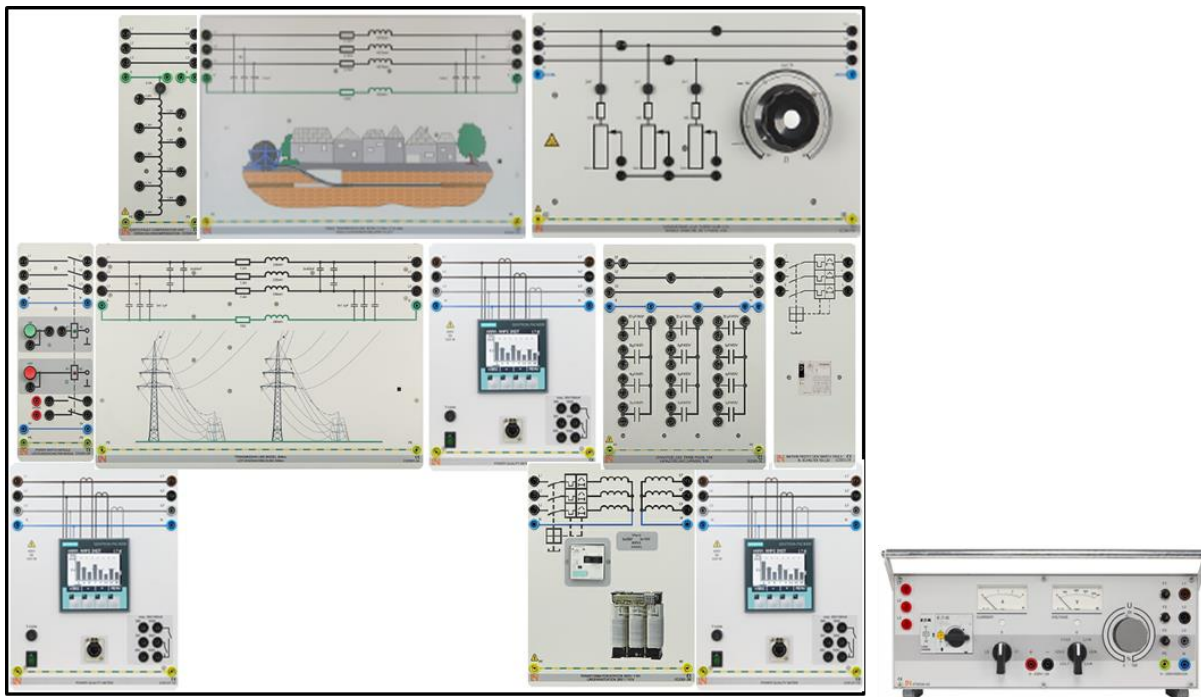
Proeftafel:		Batterijopslag	
Omschrijving:	Deze proefopstelling hangt samen met het zonnepark. De batterij is een energieopslagvoorziening voor een fotovoltaïsch systeem en heeft als doel het opslaan en verschuiven of over dragen van de opgewekte energie van de PV-installatie naar perioden van verbruik of piekverbruik. Zo kan het eigen of particuliere verbruik verhoogt worden en wordt is er een garantie van een betrouwbare energievoorziening door middel van noodstroom.		
Onderdelen			
Artikel nummer	Omschrijving		aantal
CO3208-2L	Autonome batterijopslag		1
	Aansluitpaneel opslagsysteem		1
CO3301-5R	Dubbele busbar unit, 3-fasig, inkomende/uitgaande voeding		4

A6 HVDC



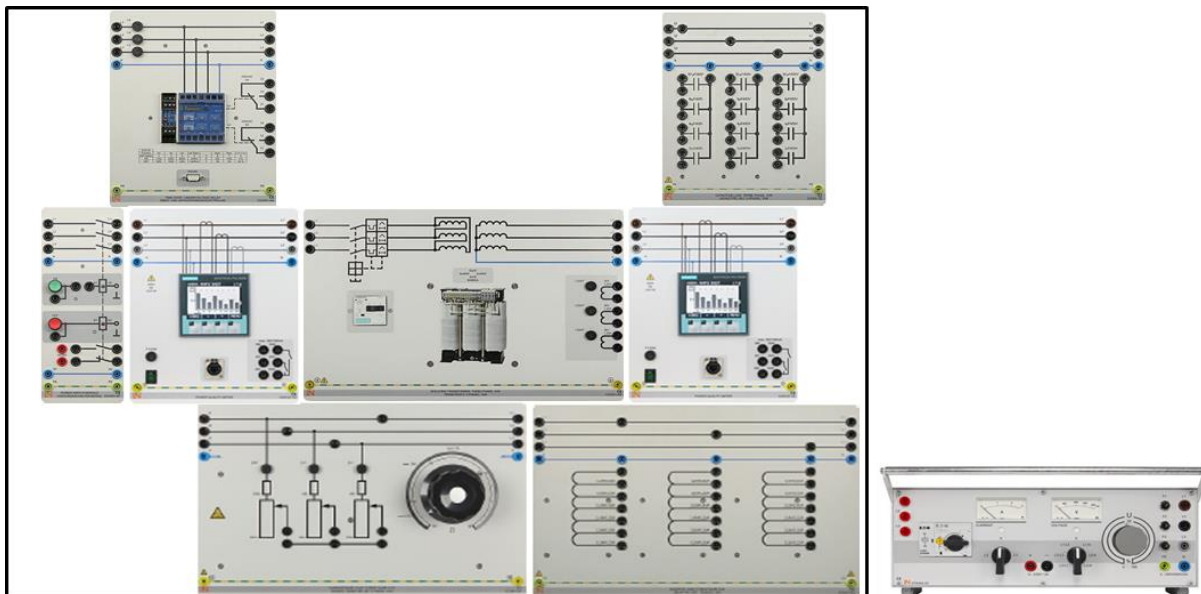
Proeftafel:		Hoogspanning DC	
Omschrijving:	Hoogspanningsgelijkstroomtransmissie is een methode om elektrische energie over te brengen door middel van hoge gelijkspanning. Deze techniek is bedoeld voor bulktransmissie van energie over lange afstanden via gelijkstroom, aangezien HVDC boven bepaalde afstanden over het geheel genomen een lager verlies te zien geeft dan het geval is bij conventionele transmissie met driefasige wisselstroom, ondanks ondanks de grotere omvormerverliezen. Deze module simuleert de werking van een HVDC verbinding tussen twee HVDC converter stations.		
Onderdelen			
Artikel nummer	Omschrijving	Aantal	
CO3301-6D	HVDC converter station 1	1	
CO3301-6E	HVDC converter station 2	1	
CO3301-6F	HVDC transmissielijnmodel 300km	2	
CO3301-3F	Variabele ohmse weerstand, 3-fasig, 1kW	1	
CO3301-3D	Inductieve belasting, 3-fasig, 1kW	1	
CO3212-5U	3-fasige stroomvoorziening voor elektrische machines	1	
CO5127-1S	3-fasige Power quality meter (slimme meter), display en lange termijn geheugen	1	
CO3301-5P	Vermogensschakelaar-module	1	
CO3301-3Z	Regelbare 3-fasige voeding, 0-450V/2A	1	

A7 HVAC



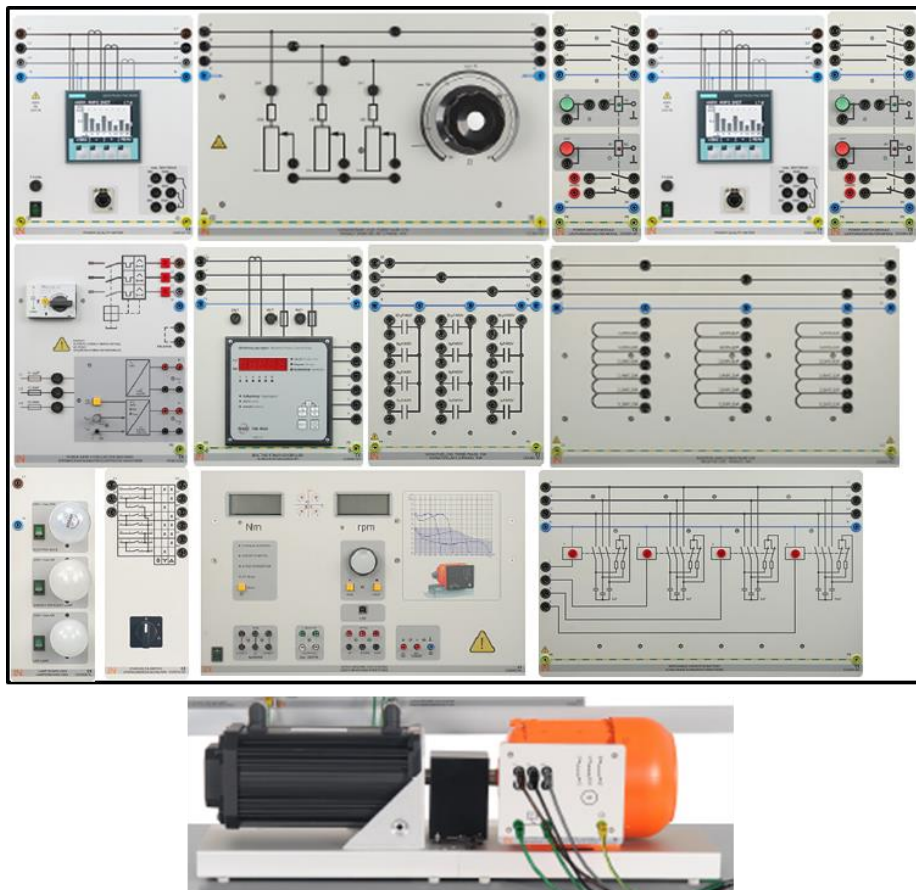
Proeftafel:		Hoogspanning AC	
Omschrijving:	Hoogspanningsnetten worden gewoonlijk gebruikt met spanningen in de orde van 110 kV tot 380 kV, waarbij stedelijke gebieden en grootschalige industriële installaties worden gevoed met 110 kV, en 380 kV wordt gebruikt voor transmissielijnen over lange afstanden. Deze module is een lijnsimulatiesysteem die gebruikt wordt bij modelspanningen tussen 110V en 380V. Via overeenkomstige overlay-maskers kunnen verschillende spanningsniveaus en lijnlengtes worden geselecteerd. Experimenten met deze proeftafel kunnen offload worden uitgevoerd, in de normale bedrijfsmodus, in aanwezigheid van een kortsluiting of een aardlek, met of zonder aardlekcompensatie. Met het systeem kunnen ook complexe netwerken worden samengesteld door de lijnsimulatiemodellen parallel of in serie te schakelen. De spanning kan worden geleverd via een vast net of een synchrone generator.		
	Onderdelen		
Artikel nummer	Omschrijving	aantal	
CO3301-3CA	Kabel transmissielijnmodel 12,5km/37,5km	1	
CO3301-3AA	Transmissielijn model 150km/300km	1	
CO3301-3M	Transformator station 380V/110V	1	
CO3301-4X	Aardfoutcompensatie-eenheid (aardlekschakelaar)	1	
CO3301-3E	Capacitieve belasting, 3-fasig, 1kW	1	
CO3301-3F	Variabele ohmse weerstand, 3-fasig, 1kW	1	
CO3301-3P	3-fasige variabele auto-transformator met motoraandrijving	1	
CO5127-1S	3-fasige Power quality meter (slimme meter), display en lange termijn geheugen	3	
CO3301-3Z	Regelbare 3-fasige voeding, 0-450V/2A	1	
CO3212-1P	Motorbeveiligingsschakelaar, 3 polig, 1,8-2,5A	1	
CO3301-5P	Vermogensschakelaar-module	1	

A8 Transformatoren



Proeftafel:		Transformatoren	
Omschrijving:	In de energietechniek worden transformatoren gebruikt om de verschillende spanningsniveaus van het elektriciteitsnet met elkaar te verbinden. In transformatorstations wordt elektriciteit van het regionale distributienet met een middenspanningsniveau van 10 tot 36 kV getransformeerd om stroom te leveren aan eindgebruikers met een laag spanningsniveau in het plaatselijke net. Het hart van een transformatorstation is de transformator zelf, waarvoor ook beveiligingsapparatuur nodig is. Deze proeftafel gebruikt transformatoren voor hands-on metingen en foutsimulaties uit te voeren waardoor de gebruiker een beter inzicht krijgt in deze complex systemen.		
Onderdelen			
Artikel nummer	Omschrijving		aantal
CO3301-3N	Scheidingstransformator, 3-fasig, 1kW		1
CO3301-4N	Tijd over-/onderspanningsrelais		1
CO3301-3F	Variabele ohmse weerstand, 3-fasig, 1kW		1
CO3301-3D	Inductieve belasting, 3-fasig, 1kW		1
CO3301-3E	Capacitieve belasting, 3-fasig, 1kW		1
CO5127-1S	3-fasige Power quality meter (slimme meter), display en lange termijn geheugen		2
CO3301-5P	Vermogensschakelaar-module		1
CO3301-3Z	Regelbare 3-fasige voeding, 0-450V/2A		1

A9 Verbruikers (R, L, C)

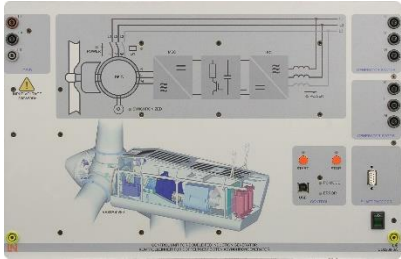
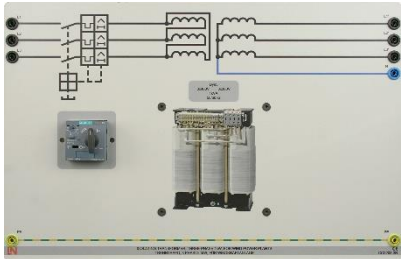


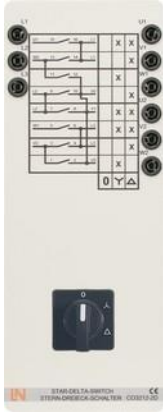
Proeftafel:		Verbruikers (R, L, C)	
Omschrijving:	Deze proeftafel bevat verschillende soorten verbruikers die aangesloten en veranderd kunnen worden op het net. Het onderwerp energiebeheer omvat het uitschakelen van verbruikers om piekbelastingen te verminderen, alsmede compensatie van reactieve belastingen om verliezen langs transmissielijnen te beperken. De asynchrone machine in de set kan dynamisch worden belast met behulp van de machinetestbank om variabele veranderingen in de belasting in de tijd op het gehele elektriciteitsnet te simuleren. Dergelijke veranderingen in de belasting worden geregistreerd door het smart-grid controlecentrum, zodat passende corrigerende maatregelen kunnen worden genomen om het net stabiel te houden.		
	Onderdelen		
Artikel nummer	Omschrijving	aantal	
CO3208-1L	Lampenbord 230V	1	
CO3301-3F	Variabele ohmse weerstand, 3-fasig, 1kW	1	
CO3301-3D	Inductieve belasting, 3-fasig, 1kW	1	
CO3301-3E	Capacitieve belasting, 3-fasig, 1kW	1	
CO3301-5D	Reactief vermogen controller	1	
CO3301-5E	Schakelbare condensatorbatterij	1	
CO3212-2D	Ster-driehoek schakelaar	1	
CO3212-5U	3-fasige stroomvoorziening voor elektrische machines	1	
CO5127-1S	3-fasige Power quality meter (slimme meter), display en lange termijn geheugen	2	
CO3301-5P	Vermogensschakelaar-module	2	
CO3636-6W	Servomachine testopstelling voor 1kW machines	1	
CO3636-6U			
SE2672-5G	3-fasen motor met kortsluitankerrotor, 1kW	1	
SE2662-6A	Rubberen koppelingsbus, 1kW	1	
SE2662-6B	Koppelingsbescherming, 1kW	1	
SE2662-6C	Asbeschermer, 1kW	1	

Bijlage B: Componenten van de labo-infrastructuur

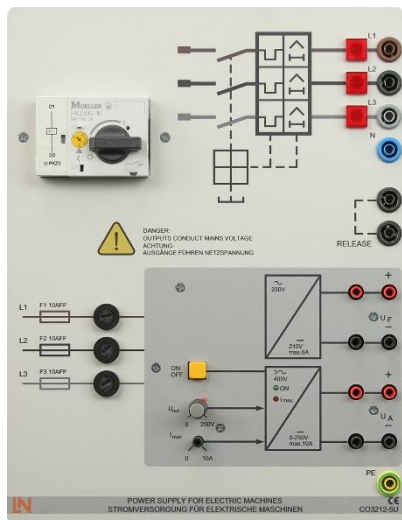
Component	Omschrijving
Lampenbord 230V	Het lampenbord maakt het onderzoek en de vergelijking mogelijk van gloeilamp, spaarlamp en LED-lamp. Alle lichtbronnen hebben dezelfde helderheid en kunnen individueel worden ingeschakeld. Technische gegevens: • Gloeilamp: 25 W • Spaarlamp: 4 W • LED-lamp: 4 W • Spanning: 230 V/50 Hz • 3 keer E27 fitting
3-fasige industriële PV-omvormer	Moderne PV-installaties voeden de elektrische stroom aan het net met behulp van een PV-omvormer. Deze bestaat uit de eigenlijke omvormer, een monitoring-eenheid en een DC-vermogenschakelaar. De omvormer heeft de volgende kenmerken: • Vermogenreductie (power derating) van 0 tot 100% in stappen van 1% • Instelbare vermogenfactor van 0,8 capacitef tot 0,8 inductief • USB-poort voor bediening op afstand via SCADA-Power-Lab • Geïntegreerde DC-vermogenschakelaar • Overbelastingsspanningsbeveiliging voor PV • DC-ingangsspanningsbereik: 250-1000 V • Uitgangsspanning: 3x400 V

Component	Omschrijving
Zonnepaneel-emulator 	De zonnepaneel-emulator is een configureerbare emulator van een zonnepaneel dat een realistische emulatie van de werking van een zonnepaneel mogelijk maakt. De emulator heeft de volgende kenmerken: • Het zonnepaneel kan worden geconfigureerd met behulp van de Solar Panel software • Implementatie van configureerbare gedeeltelijke beschaduwing van het zonnepaneel • De lichtintensiteit kan worden ingesteld van 0% tot 100% • Het is mogelijk om instralingsprofielen te configureren die de lichtintensiteit veranderen in de tijd • Het huidige bedrijfspunt (maximum power point) wordt grafisch weergegeven op zijn positie op de PV-karakteristiek in de software Technische gegevens: • Het systeem is beveiligd tegen kortsluiting • Openklemspanning: 500 V • Gesloten klemstroom: 10 A • Vermogen: 1500 W • Bedrijfsspanning: 100-240V, 45-65 Hz
Batterijopslagsysteem 	Energieopslagsystemen worden meer en meer gebruikt in combinatie met PV-installaties om het inherente verbruik automatisch op te voeren. Het batterijopslagsysteem bestaat uit de batterijopslag met een 3-fasige netomvormer, die stroom kunnen leveren aan het net of onttrekken van het net. Technische gegevens: • Beschikbare batterijcapaciteit: 2,5 kWh • Nominaal vermogen omvormer: 1,1 kW • Max. rendement van de omvormer: 96% • Levensduur batterij: 20 jaar • Chemische batterijcel: lithium-ijzerfosfaat • Laadcycli: >10 000 • Poort: ethernet • Automatische controle reactief vermogen (Var) per SCADA • Uitgangsspanning: 3x400 V

Component	Omschrijving
Controle-eenheid voor windturbine, dubbel gevoede asynchrone generator 	Moderne windturbines maken gebruik van dubbel gevoede asynchrone generatoren om vermogen aan het net te leveren. De besturingseenheid van deze generator maakt het mogelijk om een snelheidsafhankelijke dubbel gevoede asynchrone generator te besturen. Met behulp van de regeleenheid kunnen alle voor de praktijk relevante bedrijfstoestanden nagebootst en onderzocht worden. De meegeleverde WindSim-software zorgt voor een gebruiksvriendelijke bediening en visualisering van de meetwaarden. De besturingseenheid heeft de volgende kenmerken: • Twee geregelde 3-fasige omvormers (MSC en LSC) • Kan in sub-synchrone- en super-synchrone-modus werken • Autonome regeling van reactief en actief vermogen, frequentie en spanning • Handmatig en automatische synchronisatie met het net • USB-interface • Geïntegreerde remchopper maakt FRT-experimenten mogelijk • Aansluitspanning: 3 x 300 V, 50...60 Hz • Maximaal uitgangsvermogen: 1 kVA
3-fasige scheidingstransformator, 1kW voor windkrachtcentrales 	3-fasige transformator voor de voeding van de dubbel gevoede windturbine. Technische gegevens: • Primaire spanning: 3 x 400 V • Secundaire spanning: 3 x 300 V • Nominaal vermogen: 1000 VA • Zekering: 1 automatische vermogenschakelaar 1,6...2,5 A (instelbaar)

Component	Omschrijving
Dynamische netstoringssimulator 	Moderne windturbines of PV-omvormers moeten kunnen reageren op storing in het net zonder eenvoudigweg uit te schakelen. Een dergelijke reactie wordt FRT genoemd. De simulator voor dynamische netstoringen bootst dergelijke storingen in het elektriciteitsnet na. Dit maakt het mogelijk de reactie te onderzoeken van alle apparatuur die stroomafwaarts van de storing is aangesloten. De netstoringssimulator heeft de volgende kenmerken: • Instelbare stroomonderbrekingsduur van 50 ms tot 1000 ms • Instelbare spanningsval op 5 niveaus voor alle fasen • Symmetrische en asymmetrische netstoringen kunnen worden ingesteld • Fouten kunnen worden geselecteerd met of zonder aardcontact • Grafische weergave • Aansluitspanning 3x400 V, 50...60 Hz
Motorbeveiligingsschakelaar, 3 polig, 1,8-2,5A 	Vermogenschakelaar met thermische overbelastinguitschakeling en uitschakeling bij te hoge stroom. Technische gegevens: • Schakelaar-vermogen: 500 V AC bij 10 A • Nominale stroom: 1,8...2,5 A instelbaar
Ster-driehoek schakelaar 	Ster-driehoek schakelaar Technische gegevens: • Schakelaar-posities: O (uit) – ster – delta (draaischakelaar) • Schakelaar-vermogen: 690V, 12A max.

3-fasige stroomvoorziening voor elektrische machines



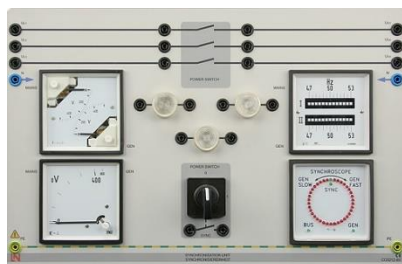
Voeding voor wisselstroom en 3-fasen. De voeding is speciaal ontworpen voor gebruik met elektrische machines.

Technische gegevens:

- Drie fasen: L1, L2, L3, N
- Beveiligingen: motor beveiligingsschakelaar instelbaar van 6,3...16 A, onderspanningstrip, veiligheidsuitschakeling
- Stroomaansluiting: 3x230/400 V, 50/60 Hz

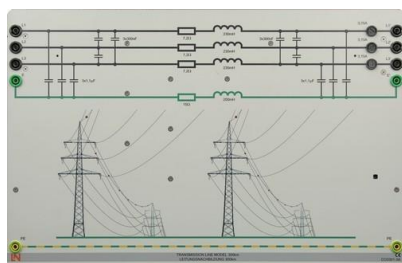
De synchronisatie-eenheid bestaat uit:

Synchronisatie-eenheid



- Synchronisator-display (bestaande uit 3 lampjes) wordt gebruikt om de spanning en de fasehoeken tussen de generatoren en het voedingscircuit weer te geven (licht-donker indicatie)
- Nulspanningsmeter
- Dubbele frequentiemeter
- Dubbele spanningsmeter
- Digitale synchronoscoop
- Synchronisatieschakelaar
- Bedrijfsspanning: 400 V

Transmissielijnmodel 150km/300km

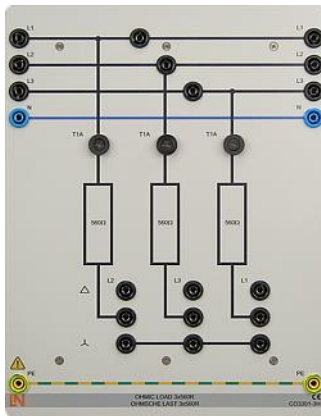


3-fasige lijnsimulatie van bovengrondse hoogspanningslijn met verschillende lengten (150 km of 300 km) voor het meten van verschillende operationele toestanden (open-lijn, onderbroken, kortsluiting). Schaalfactor 1/1000 voor stroom en spanning. Automatische wijziging van de draadlengte zodra de overeenkomstige overlay op zijn plaats is (gecheckt met sensor).

Technische gegevens:

- Weerstand per fase: 3,6 Ω of 7,2 Ω
- Inductantie per fase: 115 mH of 230 mH
- Capaciteit per fase: lijn-lijn 2x150 nF of 2x 300 nF; lijn-aarde: 2x 0,55 μ F of 1,1 μ F
- Max. vermogenverbruik: 1 kW
- Spanning: 3x400 V; 50/60 Hz
- Stroomsterkte: 2A

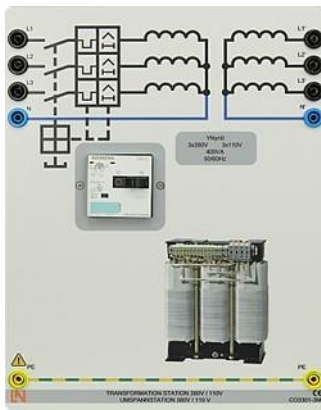
Component	Omschrijving
Kabelmodel 12,5km/37,5km	Simulatie van 3-fasige lijn van een ondergrondse hoogspanningskabel met verschillende lengten (12,5 km of 37,5 km) voor het meten van verschillende operationele toestanden (open-lijn, matched, kortsluiting). Schaalfactor 1/1000 voor stroom en spanning. Technische gegevens: • Weerstand per fase: 0,25 Ω of 0,75 Ω • Inductantie per fase: 6,25 mH of 18,75 mH • Capaciteit per fase: 2x2 nF of 2x6 nF • Max. vermogenverbruik: 400 W • Spanning: 3x110 V; 50/60 Hz • Stroomsterkte: 1A
Inductieve belasting, 3-fasig, 1kW	Bestaat uit drie inductieve belastingen met de volgende instelbare tapstanden: 1,2 H (0,65 A), 1,6 H (0,5 A), 2 H (0,45 A), 2,4 H (0,35 A), 2,8 H (0,30 A) en 3,2 H (0,25 A), voor parallelle, serie-, ster- en driehoekschakelingen.
Capacitieve belasting, 3-fasig, 1kW	Drie groepen MP-condensatoren, elk bestaande uit vier condensatoren, voor parallelle-, serie-, ster- en driehoekschakelingen. Capaciteit: 3x2/4/8/30 μF, 450 V
Variabele ohmse weerstand, 3-fasig, 1kW	Drie synchroon instelbare ronde regelweerstanden met schaal 100 – 0%, elk met een zekering in de aansluiting. Bruikbaar voor parallel-, serie-, ster- en driehoekschakelingen. Technische gegevens: • Weerstand: 3x750 Ω • Stroomsterkte: 3x2 A

Ohmse weerstand 3x 560 Ω 

Drie weerstanden elk met een zekering, voor parallelle-, serie-, ster- en driehoekschakelingen.

Technische gegevens:

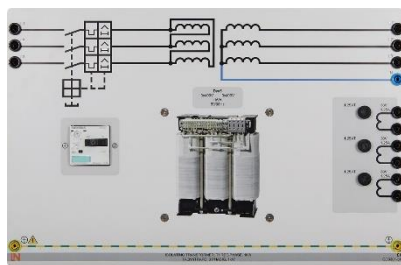
- Weerstand: 3x560 Ω
- Stroomsterkte: 3x0,5 A

**Transformator station
380V/110V**

Transformator voor de levering van elektriciteit, schaal 1/1000 voor spanning en stroom aan de secundaire zijde.

Technische gegevens:

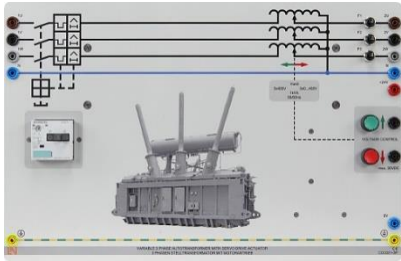
- Primair: 3x380 V wikkelingen
- Secundair: 3x110 V wikkelingen
- Nominaal vermogen: 400 VA
- Vectorgroep: YNyn0
- Beveiliging: 1 automatische vermogenschakelaar 0,7...1 A (instelbaar)

Scheidingstransformator, 3-fasig, 1kW

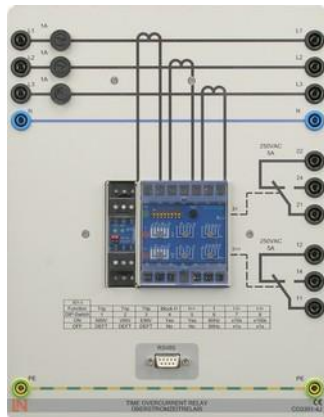
3-fasige scheidingstransformator, schaalfactor 1:1000 voor secundaire stroom en spanning.

Technische gegevens:

- Ingangsspanning: 3x400 V
- Uitgangsspanning/stroom 1: 3x400 V, 2 A
- Uitgangsspanning/stroom 2: 3x30 V, 1,25 A
- Vermogen: 1000 VA, voor een korte tijd: 2000 VA
- Vectorgroep: Dyn5
- Beveiliging: 1 automatische vermogenschakelaar 1,8-2,5 A instelbaar

Component	Omschrijving
3-fasige variabele auto-transformator met motoraandrijving 	Het doel van deze regeltransformator is het compenseren van de spanningsschommelingen van vermogenstransformatoren die het gevolg zijn van veranderingen in belasting. Dit wordt bereikt door de transformatieverhouding (tapstand) te wijzigen aan de kant waar de spanning te hoog is. De component kan gebruikt worden als step-up of step-down transformator. De regeling gebeurt via de ingangen voor het verhogen of verlagen van de spanning, dit kan handmatig of via de SCADA gebeuren. Technische gegevens: • Primair: 3x tot 400 V wikkelingen • Secundair: 3x 0...450 V, 2 A wikkelingen • Nominaal vermogen: 1000 VA • Frequentie: 50/60 Hz • Vectorgroep: Yano • 24 V ingang/knop spanning verhogen • 24 V ingang/knop spanning verlagen • Beveiliging: 1 automatische vermogenschakelaar (instelbaar)
Regelbare 3-fasige voeding, 0-450V/2A 	Regelbare 3-fasige voeding 0...255/450 V voor continue 3-fasige voeding. Technische gegevens: • Aansluitspanning: 230/400 V, 50/60 Hz • Uitgangsspanning: 3x 0...450 V, 50/60 Hz variabel door middel van 3-fasen regeltransformator (tolerantie 0,5%) • DC uitgangsspanning: 0...250 V • Uitgangsstroom: 2,0 A • Voltmeter: 0...450 V (analoog) • Ampèremeter: 0...3 A (analoog) • 3 fasecontrole lampjes • 1 meetpunt-keuzeschakelaar (spanning): L1-N, L2-N, L3-N, L1-L2, L1-L3, L2-L3 • 1 meetpunt-keuzeschakelaar (stroom): I1, I2, I3 • Bescherming: 3 thermo-magnetische vermogenschakelaars, motorbeveiligingsschakelaar instelbaar van 1,6...2,5 A met onderspanningsuitschakeling

Tijd-overstroom relais



Het paneel bevat een digitaal, 3-fasig tijd-overstroomrelais. Het relais heeft drie inverse stroomkarakteristieken (normaal, sterk invers en extreem invers). De parameters van het relais kunnen handmatig ingesteld worden.

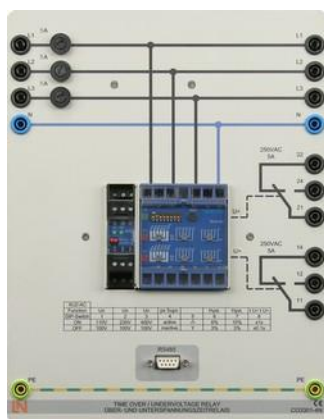
Technische gegevens:

- Nominale frequentie: 50 tot 60 Hz
- Verbruik in de stroomkring: 0,1 VA bij $I_N = 1$ A
- Thermische belastbaarheid van stroomkring: Schommelingsstroom (halve golf) $250 \times I_N$, voor 1 s $100 \times I_N$, voor 10 s $30 \times I_N$, continu $4 \times I_N$

Uitgang relais:

- Inschakelstroom: 20 A
- Nominale stroom: 5 A
- Max. contactvermogen: 1250 VA/DC, 120W/DC, ohmse; 500VA/AC, 75W/DC, inductief
- Uitschakelparameters: $I > 0,5 \times I_N$, $I > 1-15 \times I_N$, $t_I > 0-100$ s, $t_I > 0-2,5$ s

Tijd over-/onderspanningsrelais



Het paneel bevat een over- en onderspanningsrelais, waarvan de over- en onderspanningsuitschakeltijden individueel instelbaar zijn.

Technische gegevens:

- Nominale spanning: 100 V/ 110 V/ 230 V/ 400 V
- Nominale frequentie: 45-66 Hz
- Stroomverbruik: 3,5 VA
- Thermische stabiliteit: $1,3 \times V_N$ (constant)
- Reset verhouding: instelbaar, via hysteresis
- Vrijgavetijd: 300 ms
- Reactietijd: 300 ms, minimum

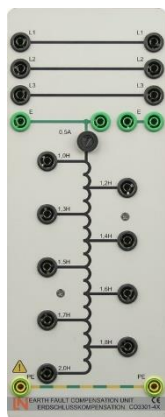
Uitgang relais:

- Inschakelstroom: 20 A
- Nominale stroom: 5 A
- Max. contactvermogen: 1250 VA/DC, 120W/DC, ohmse; 500VA/AC, 75W/DC, inductief

Potentiometer regelt:

- voor $V < V_N$ 70%...110%
- voor $V > V_N$ 90%...130%
- voor t_{OS} ...10s
- voor differentieel 2%...10%

Aardfoutcompensatie-eenheid (aardlekschakelaar)

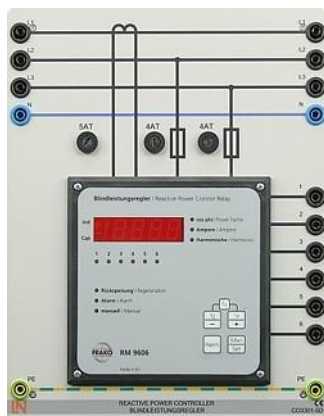


De aardlekschakelaar wordt aangesloten tussen de neutrale lijn en de aarding om de capacatieve aardlekstroom te compenseren door de juiste inductantie te kiezen. Deze kan variabel worden ingesteld om de aanpassing van de aardlekspoelen aan de verschillende schakeltoestanden van het stroomvoorzieningssysteem te vergemakkelijken. (Petersen-spoel)

Technische gegevens:

- Nominale spanning: 230 V
- Max. stroom: 0,5 A
- Spoel: 1,0 tot 2,0 H, 9 variabele tapstanden

Reactief vermogen controller

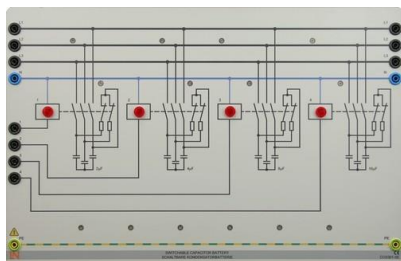


De reactieve en actieve componenten van het elektriciteitsnet worden continu gedetecteerd aan de hand van de signalen in de het stroomcircuit (stroomtransformator) en het spanningscircuit (vermogensaansluiting). Met de regelaar kan de gewenste cosphi ingesteld worden, hierdoor worden deze componenten geregeld.

Technische gegevens:

- Bedrijfsspanning: 200-400 V
- Frequentie: 50/60 Hz
- Controlecontacten: 6 potentiaalvrije relaiscontacten
- Belastbaarheid van besturingscontacten: schakelspanning 400 V AC; 250V AC
- Schakelstroom: 5 A maximaal
- Vermogen: 1800 VA maximaal

Schakelbare condensatorbatterij



Deze condensatorbatterij omvat 4 schakeltoestanden, die kunnen geactiveerd en gedeactiveerd worden door middel van vermogensschakelaars. Deze schakelingen bestaan elk uit 3 condensatoren in ster configuratie samen met ontladweerstand.

Technische gegevens:

- Toestand 1: 3x2 μ F, 450 V, 50 Hz
- Toestand 2: 3x4 μ F, 450 V, 50 Hz
- Toestand 3: 3x8 μ F, 400 V, 50 Hz
- Toestand 4: 3x16 μ F, 400 V, 50 Hz
- Compenserend reactief vermogen: max. 1546 var

Component

Omschrijving

Excitatie-spanningsregelaar met de-excitatie

De spanningsregelaar van de excitator (bekrachtiger) wordt gebruikt bij experimenten waarbij synchronisatie een rol speelt. De de-excitatieschakelaar wordt gebruikt bij generatorbeveiligingsmaatregelen en is verantwoordelijk voor het loskoppelen van de generator van het net en het de-exciteren van de generator in geval van een storing.

Technische gegevens:

- Uitgang: DC 200 V/ 2 A
- 1 ingang voor de-excitatie van met behulp van relais
- 1 ingang voor het inschakelen van de DC-spanning
- 2 drukknoppen voor het in- en uitschakelen van de DC-spanning
- Spanningsvoorziening: 230V, 50/60 Hz

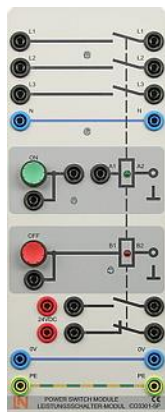
HMI (Human Machine Interface) voor generatoren

De generatorregeleenheid (HMI) maakt de bediening en monitoring van de generator mogelijk met behulp van optionele SCADA-software. Naast de meting en weergave van alle relevante net-vermogen-parameters regelen de in- en uitgangen van de regeleenheid de generator. De weergaven en bediening gebeurt menugestuurd via een LC-display of via de SCADA.

Technische gegevens:

- 3-fasige meting van stroom en spanning tot 3x400 V/5 A
- Meting van fasespanningen, lijnspanningen en stromen
- Bepaling van het schijnbaar, reactief en actief vermogen
- Bepaling van de frequentie en vervormingsfactoren voor stroom en spanning
- Detectie van harmonische oscillaties en nul-leiderstroom in de elektriciteitsvoorziening
- Puls-metingen
- Detectie van piek- en gemiddelde waarden
- Gebeurtenissenregistratie, real-time klok
- Grootchalige, contrastrijke grafische display
- Weergave in tabellen, diagrammen en vectordiagrammen
- 2 digitale ingangen en 6 digitale uitgangen
- Max. meetwaarden: 690 V/ 5 A
- Bedrijfsspanning: 110 V – 230 V, 50/60 Hz
- Meetnauwkeurigheid: U 0,2%, I 0,2%, S 0,5%, P 0,2% en Q 1%,

Vermogensschakelaar-module

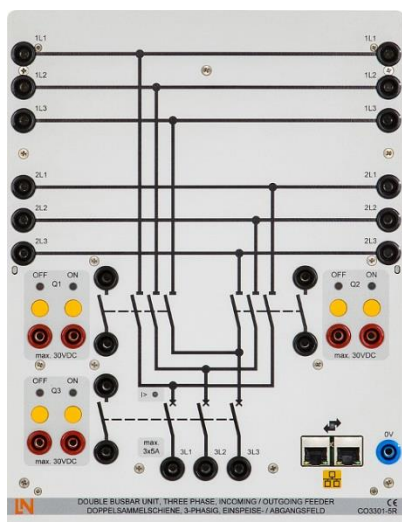


Vermogensschakelaar-module, de toevoer van de spanning kan handmatig of automatisch bediend worden.

Technische gegevens:

- Nominale spanning: 200-400 V, 50/60 Hz
- Stuurspanning: 24 V
- Nominale stroom: 16 A
- Functies: 2 drukknopschakelaars en mogelijke op afstand bediening voor uitschakelrelais
- Indicatoren: signaallampjes voor “aan” en “uit”

Dubbele busbar unit, 3-fasig, inkomende/uitgaande voeding



Het paneel bestaat uit twee busbars voor gebruik met parallelle lijnen. De busbars hebben twee uitgaande voedingen, die kunnen worden aangesloten of losgekoppeld met behulp van isolatoren (scheiders). De vermogensschakelaar maakt de verbinding met de belasting of de voeding.

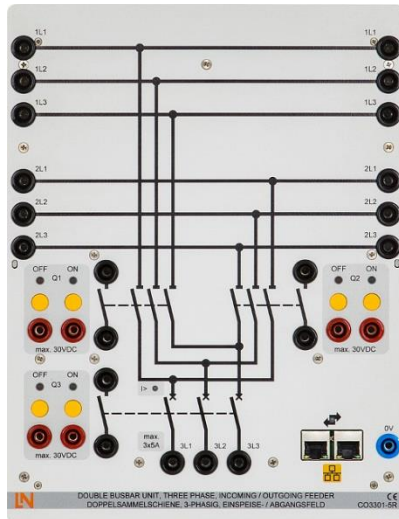
Technische gegevens:

- 2 scheidingsschakelaars (isolatoren) met afstandsschakelmechanisme en hulpcontact
- 1 vermogensschakelaar 5 A, met afstandsschakelmechanisme en hulpcontact
- Indicatoren: statuslampjes voor de isolatoren en de vermogensschakelaar
- Bediening via drukknoppen, sturingen of SCADA
- Akoestisch alarm voor waarschuwings- en alarmsignalen
- 3-fasige stroommeting tot 5 A, 3x driefasige spanningsmeting tot 500 V
- Stuurspanning: 24 V

Component

Omschrijving

Dubbele busbar unit, 3-fasig, koppelpaneel

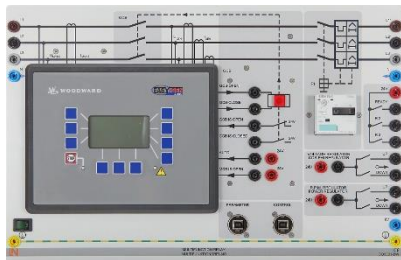


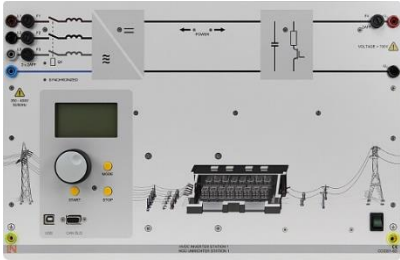
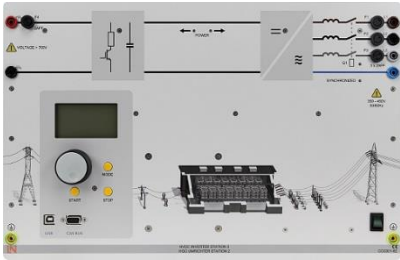
Het paneel bestaat uit twee busbars voor gebruik met parallelle lijnen. De busbars hebben twee uitgaande voedingen, die kunnen worden aangesloten of losgekoppeld met behulp van isolatoren (scheiders). De vermogenschakelaar verbindt de twee parallelle lijnen. (busbars)

Technische gegevens:

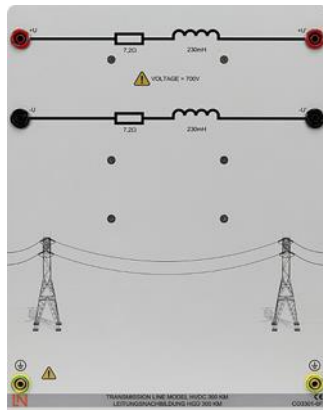
- 2 scheidingsschakelaars (isolatoren) met afstandsschakelmechanisme en hulpcontact
- 1 vermogenschakelaar 5 A, met afstandsschakelmechanisme en hulpcontact
- Indicatoren: statuslampjes voor de isolatoren en de vermogenschakelaar
- Bediening via drukknoppen, sturingen of SCADA
- Akoestisch alarm voor waarschuwings- en alarmsignalen
- 3-fasige stroommeting tot 5 A, 3x driefasige spanningsmeting tot 500 V
- Stuurspanning: 24 V

Component	Omschrijving
Multifunctioneel relais, vermogensregelaar, cos-phi regelaar, synchronisatie- eenheid	Het multifunctionele relais is ontworpen voor de besturing, beveiliging en monitoring van generatoren. De instellingen en parameters kunnen worden ingesteld met behulp van het controlepaneel of met een PC. Deze kan vanop afstand bedient worden via interface en discrete/analoge ingangen voor het instellen van toerental, frequentie, spanning, vermogen, reactief vermogen en cosphi-setpoints. Controle functies: • Automatische synchronisatie • Automatische vermogensregeling • Automatische vermogensfactorregeling • Automatische spanningsregeling • Automatische frequentiecontrole • Automatische actieve en reactieve vermogensverdeling • Verzameling van bedrijfsgegevens Beveiligings- en monitoringsfuncties: • Generator: spanning/frequentie (ANSI 59 / 27 / 81O / 81U) • Generator: overbelasting, omgekeerd/verminderd vermogen (ANSI 32 / 32R / 32F) • Generator: onevenwichtige belasting (ANSI 46) • Generator: onmiddellijke overstroom (ANSI 50) • Generator: tijd-overstroom (ANSI 51) • Generator: aardlek (ANSI 50G) • Generator: vermogensfactor (ANSI 55) • Generator: rotatieveld • Generatoraggregaat: snelheids-/frequentieafwijking • Net: spanning/frequentie/faseverschuiving/ROCOF (ANSI 59/27/81O/81U/78) • Net: rotatieveld Technische gegevens: • Meetspanning: 380...440 V AC • Meetfrequentie: 40...85 Hz • Meetstroom: 2,5 A • Motorbeveiligingsschakelaar 1-1,6 A instelbaar



Component	Omschrijving
HVDC converter station 1 	Een HVDC-transmissiesysteem bestaat eigenlijk uit een omvormerstation, dat de wisselspanning van het net omzet in gelijkspanning, een transmissielijn en een ander omvormerstation, dat de gelijkspanning weer omzet in wisselspanning. Hierdoor kan energie in beide richtingen getransporteerd worden. Er zijn altijd twee omvormerstations nodig om dit systeem te laten werken.
	HVDC-omvormerstation 1 heeft de volgende kenmerken: • Bedrijfsmodussen: Controle van actief vermogen in beide richtingen; STATCOM-modus; Koppeling aan het elektriciteitsnet bij verschillende frequenties; FRT ondersteuning • Opwekking van AC-spanningen met minimale harmonischen door middel van IGBT's • Automatische regeling van reactief en actief vermogen, frequentie en spanning • Overdracht van maximaal 1 kW actief vermogen • Levering van maximaal 1 kVAr reactief vermogen • DC-link spanning instelbaar tot 750 V DC • Ingebouwde vermogenschakelaar voor inschakeling op het net • Ingebouwde remchopper • Voedingsspanning: 3x400 V, 50...60 Hz
HVDC converter station 2 	HVDC-omvormerstation 2 heeft de volgende kenmerken: • Bedrijfsmodussen: Controle van actief vermogen in beide richtingen; STATCOM-modus; Koppeling aan het elektriciteitsnet bij verschillende frequenties; FRT ondersteuning • Opwekking van AC-spanningen met minimale harmonischen door middel van IGBT's • Automatische regeling van reactief en actief vermogen, frequentie en spanning • Overdracht van maximaal 1 kW actief vermogen • Levering van maximaal 1 kVAr reactief vermogen • DC-link spanning instelbaar tot 750 V DC • Ingebouwde vermogenschakelaar voor inschakeling op het net • Ingebouwde remchopper • Voedingsspanning: 3x400 V, 50...60 Hz

HVDC transmissielijnmodel 300km

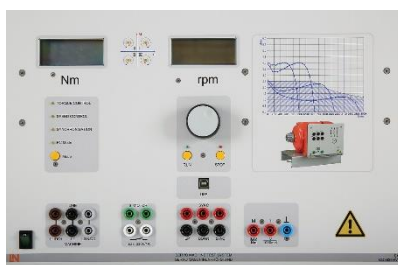


Simulatie van HVDC-transmissielijn met een schaalfactor van 1/1000 voor stroom en spanning.

Technische gegevens:

- Lengte transmissielijn: 300 km
- Weerstand per fase: $7,2 \Omega$
- Inductatie per fase: 230 mH
- Max. stroomverbruik: 1 kW
- Spanning: 700 V DC
- Stroomsterkte: 2 A

Servomachine- testopstelling

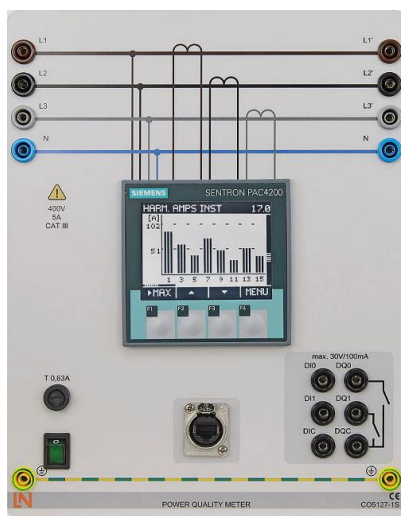


De servomachine-testopstelling is een compleet testsysteem voor het onderzoeken van elektrische machines en aandrijvingen. Het bestaat uit een digitale controller en een rem. Het systeem combineert state-the-art-technologie met bedieningsgemak. Met het systeem kan ook handmatige en geautomatiseerde synchronisatie worden uitgevoerd.

De controller heeft de volgende kenmerken:

- Dynamische en statische werking in vier kwadranten
- Controle op aanwezigheid van een asbedekking
- Uitschakeling van de voedingsspanning van de te testen motor bij afwezigheid van de asbedekking
- Geïntegreerde galvanisch geïsoleerde versterker voor spannings- en stroommeting
- Vierkwadrant monitor
- Thermische beveiliging van de te testen machine
- Aansluitspanning: 400 V, 45...65 Hz
- Maximaal uitgangsvermogen: 10 kVA
- Maximumsnelheid: 4000 rpm
- Maximumkoppel: 30 Nm

3-fasige Power Quality meter (slimme meter)



Technische gegevens:

- 3-fasige meting van stroom en spanning tot 3x400 V/5 A
- Meting van fasespanningen, lijnspanningen en stromen
- Bepaling van het schijnbaar, reactief en actief vermogen
- Bepaling van de frequentie en vervormingsfactoren voor stroom en spanning
- Detectie van harmonische oscillaties en nullederstroom in de elektriciteitsvoorziening
- Puls-metingen
- Detectie van piek- en gemiddelde waardes
- Gebeurtenissenregistratie, real-time klok
- Grootschalige, contrastrijke grafische display
- Weergave in tabellen, diagrammen en vectordiagrammen
- 2 digitale ingangen vrij te configureren
- Max. meetwaarden: 690 V/ 5 A
- Bedrijfsspanning: 110 V – 230 V, 50/60 Hz
- Meetnauwkeurigheid: U 0,2%, I 0,2%, S 0,5%, P 0,2% en Q 1%,

Analoog/digitale multimeter



Universeel meetapparaat dat gelijktijdig vier verschillende meetinstrumenten kan vervangen: het is een stroom/spanningsmeter, vermogensmeter en een fase-hoekmeter in één.

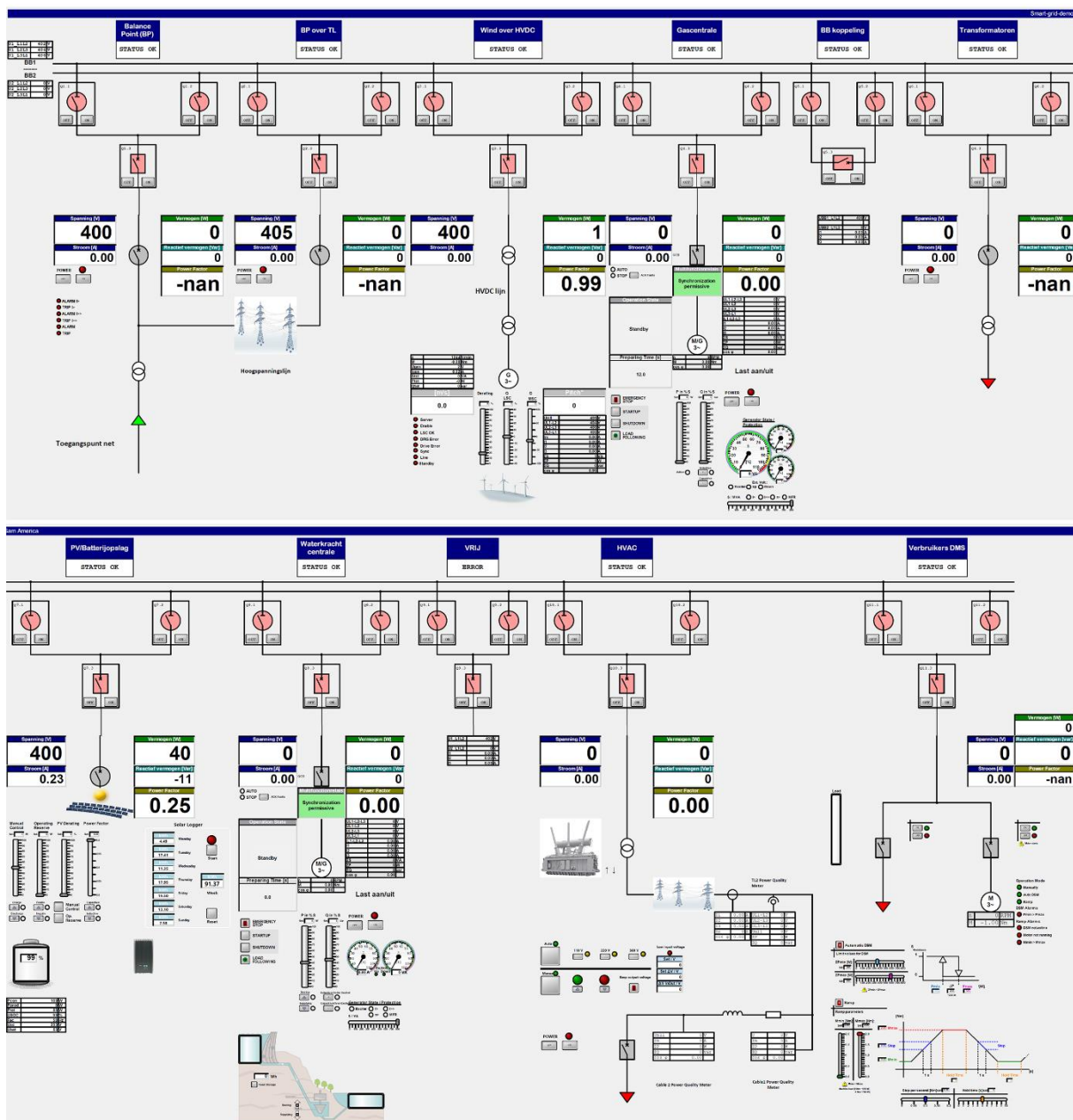
Technische gegevens:

- Onafhankelijke ingangen voor stroom en spanning
- Interne weerstand: voor stroom 10 mΩ, voor spanning 10 MΩ
- Spanningsbereiken: 30, 300, 600 V
- Stroombereiken: 1, 10, 20 A
- Bedrijfsspanning: 230 V, 50/60 Hz

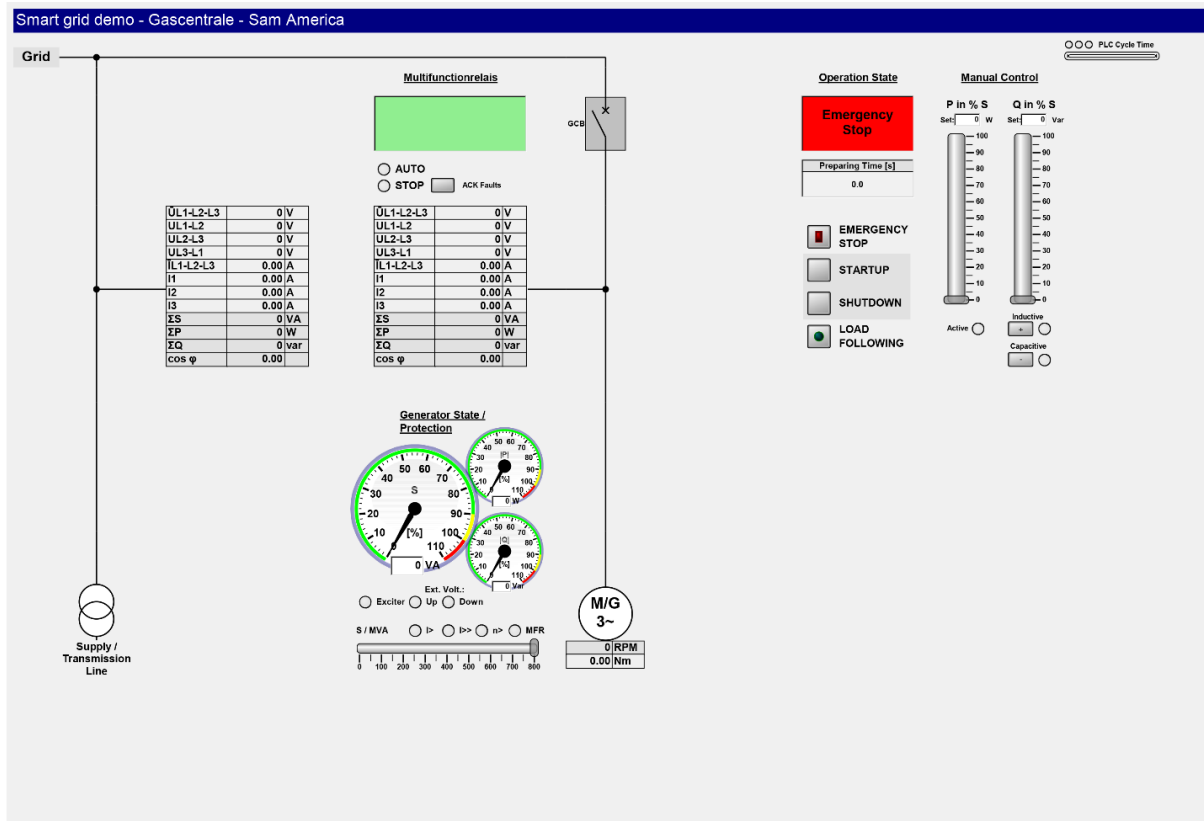
Component	Omschrijving
3-fasen motor met kortsluitankerrotor, 1kW 	Driefasige asynchrone machine met uitgesproken koppel. Technische gegevens: • Nominaal vermogen: 1,1 kW • IE3, η: 84,4 • Nominaal toerental: 1445 rpm • Nominale spanning: 690/400 V, 50 Hz • Nominale stroom: 1,45/2,55 A • Cosphi: 0,75
3-fasige synchrone machine met smooth-kern rotor, 1kW 	Technische gegevens: • Nominale spanning: 400/230 V, 50 Hz • Nominale stroom: 1,5 A/2,6 A • Nominaal toerental: 1500 rpm • Nominaal vermogen: 0,8 kW • Cosphi: 0,8 ... 1 ... -0,8 • Spanning excitator (bekrachtiging): 220 V • Stroom excitator (bekrachtiging): 1,6 A
3-fasige multifunctionele machine, 1,0 kW 	3-fasige asynchrone motor met sleepringen synchrone machine. Technische gegevens: • Nominale spanning: 400/230 V, 50 Hz • Nominale stroom: 2,0 A/ 3,5 A • Nominaal toerental: 1400/ 1500 rpm • Nominaal vermogen: 0,8 kW • Cosphi: 0,75 • Spanning excitator (bekrachtiging): 130 V AC/ 24 V DC • Stroom excitator (bekrachtiging): 4 A AC/ 11 A DC

Bijlage C: SCADA-HMI's van de smart-grid-opstelling

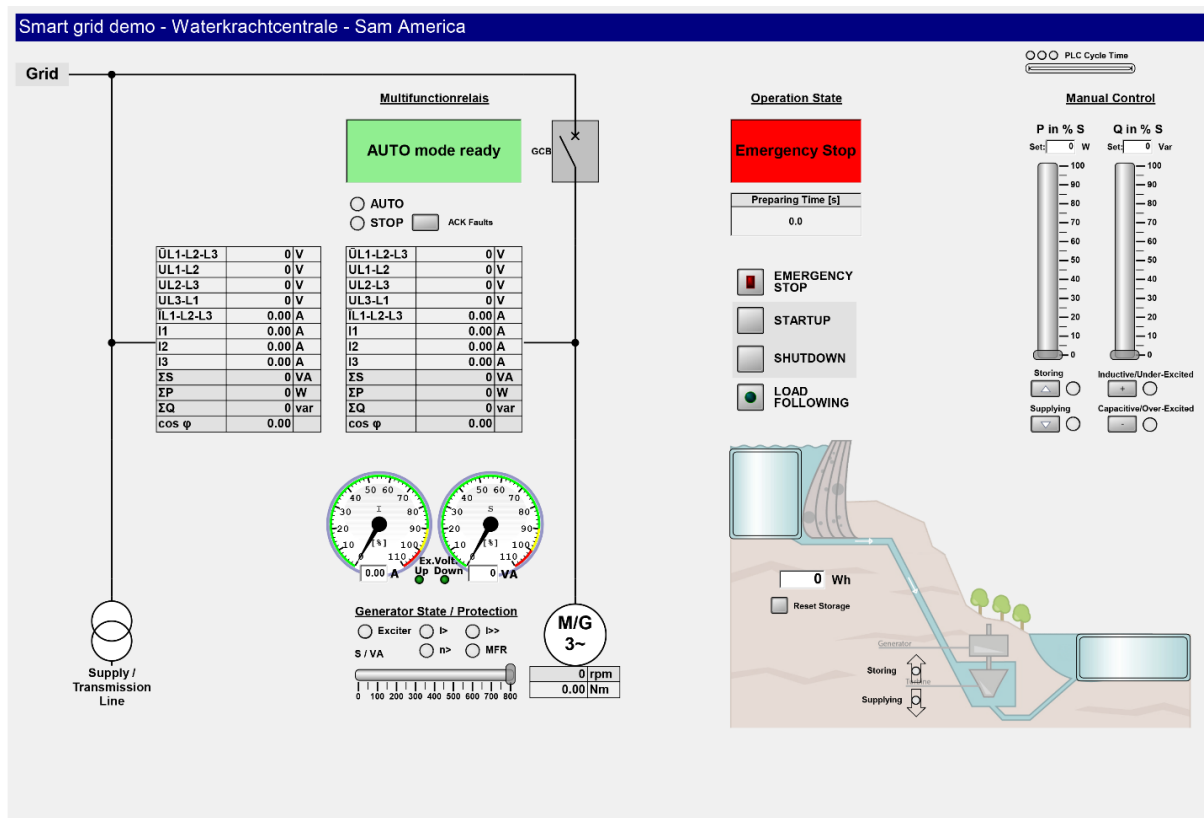
C1 Hoofd HMI van het SGCC



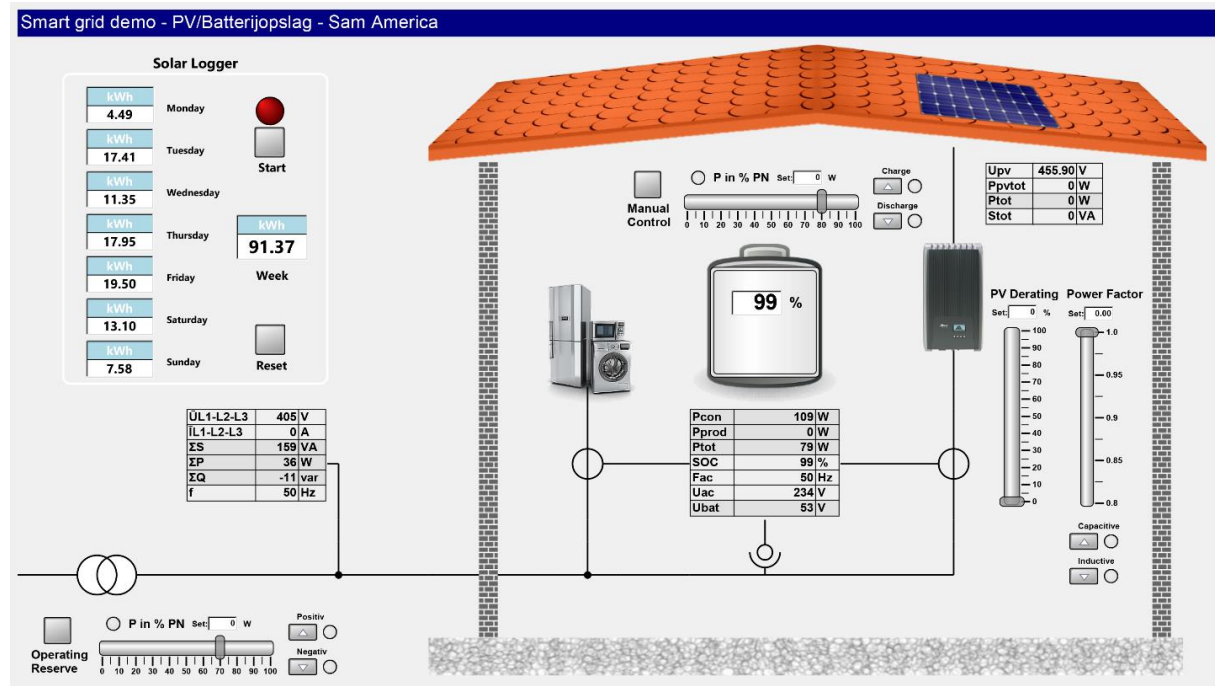
c2 HMI van de gascentrale



c3 HMI van de waterkrachtcentrale



C4 HMI van het zonnepark en de batterijopslag



C5 HMI van de verbruiker-proeftafel

