



Inhoudsopgave

1. GEGEVENS PROJECT	2
2. INHOUDELIJK EINDRAPPORT	2
2.1 SAMENVATTING	2
2.2 INLEIDING	3
2.3 DOELSTELLING	3
2.4 WERKWIJZE	3
2.5A RESULTATEN VAN HET PROJECT	4
2.5B RESULTATEN MOGELIJKHEDEN VOOR SPIN-OFF EN VERVOLGACTIVITEITEN	4
2.6 DISCUSSIE	5
2.7 CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN	5
3 UITVOERING VAN HET PROJECT	5
3.1 TECHNISCHE EN ORGANISATORISCHE PROBLEMEN EN OPLOSSINGEN DAARVAN	5
3.2 TOELICHTING OP WIJZIGEN T.O.V. PROJECTPLAN	6
3.3 TOELICHTING VERSCHILLEN BEGROTING EN WERKELIJKE KOSTEN	6
3.4 TOELICHTING WIJZE VAN KENNISVERSPREIDING	6
3.5 TOELICHTING PR PROJECT EN VERDERE PR MOGELIJKHEDEN	7

1. Gegevens project

Projectnummer:	1721403
Projecttitel:	Decentrale Optimalisatie en Sturing Elektriciteitsdistributienetten (DOSE)
Penvoerders en medeaanvragers:	Technische Universiteit Eindhoven (penvoerder) Enexis Netbeheer B.V. (deelnemer) KPMG N.V. Advisory NL (deelnemer)
Projectperiode:	01-11-2018 t/m 31-10-2022

2. Inhoudelijk eindrapport

2.1 Samenvatting

De Technische Universiteit Eindhoven, Enexis en KPMG zijn in 2018 het project DOSE gestart met als doel om een framework te ontwikkelen voor een gedistribueerde architectuur voor informatieverwerking, ten behoeve van distributie-automatisering.

Aanleiding hiervoor is gelegen in de sterk toenemende elektrificatie als ook decentralisatie van opwek, waardoor grote hoeveelheden data worden gegenereerd over stromen en netspanningen. Door deze ontwikkeling zal de huidige centralistische architectuur voor verwerking van deze data in de toekomst onvoldoende toereikend zijn. Omdat de netsturing ook op basis van (de analyse van) deze data plaatsvindt, vormt dit uiteindelijk een probleem voor de leveringszekerheid. De oplossing is gelegen in het (meer) decentraal verwerken en sturen op deze data; een gedistribueerde architectuur. Eén probleem; deze bestaat nog niet.

Om te komen tot een raamwerk voor een dergelijke architectuur en te onderzoeken hoe deze data decentraal kan worden geprocessed, zijn er in het project de volgende activiteiten ondernomen;

1. Onderzoek naar de impact van de toename van meetgegevens (grid data) op I. Datanetwerktopologieën, II. Gedistribueerde en gedecentraliseerde dataverwerking en III. Gedecentraliseerd netwerkmanagement;
2. Onderzoek en ontwerp van een big data referentiearchitectuur voor het veilig en decentraal distribueren en beheren van analyse-algoritmen;
3. Ontwikkelen van een datakwaliteitsmodel voor de decentraal gegenereerde data;
4. Het ontwikkelen van een big data referentiearchitectuur voor een hybride overlay connectiviteitsnetwerk met bijbehorend 'operating model';
5. Ontwikkeling van een prototype leeralgoritme voor beheer van een dergelijk data gedreven netwerk en architectuur.

Met behulp van de ontworpen big data referentiearchitectuur (2) is er een algoritme gedistribueerd waarmee foutieve sensordata uit bemeten distributietransformatoren geïdentificeerd kon worden (3). Hiermee is zowel de referentiearchitectuur als het datakwaliteitsmodel gevalideerd. Vervolgens is er een architectuur ontworpen om een batterij in een gebouw te kunnen besturen met behulp van machine-learning technieken (4). Daarna is dit getest door een leeralgoritme te ontwerpen welke de batterij aanstuurde op basis van de (decentrale) data uit de buurt van de batterij (5). Zoals gehoopt kon dit algoritme met voldoende betrouwbaarheid foutieve sensordata identificeren en uitfilteren, en over tijd de aansturing van de batterij steeds effectiever uitvoeren, wat uiteindelijk leidde tot een verbetering van het decentrale energieprofiel.



Samengevat betekent dit dat het project een eerste framework voor decentrale distributie-automatisering heeft opgeleverd en dat dit ook goed blijkt te werken. Hiermee is de doelstelling behaald en kan het project met recht een succes genoemd worden. Voor een succesvolle transfer naar de praktijk is het nog wel noodzakelijk om het algoritme te implementeren in de ICT-architectuur van de systemen die het elektriciteitsnet bewaken en besturen.

2.2 Inleiding

Decentrale opwek i.c.m. elektrificatie van het energieverbruik leidt tot behoefte aan intensievere metingen en data in het elektriciteitsdistributienet. Ten tijde van aanvang van dit project was de verwachting dat binnen 10 jaar dusdanig grote hoeveelheden data over stromen en spanningsniveaus worden gegenereerd dat als gevolg daarvan de huidige centralistische architectuur onvoldoende toereikend zal zijn. Daarom hebben TU/e, KPMG en Enexis middels dit project besloten te onderzoeken hoe deze data decentraal kan worden geprocessed. Onder andere door het toepassen van Machine Learning analyse-algoritmen die automatisch worden gedistribueerd en waarbij alleen het resultaat van de decentrale analyse centraal wordt opgeslagen.

2.3 Doelstelling

Doelstelling van het project was om een framework te ontwikkelen voor een gedistribueerde architectuur voor informatieverwerking, ten behoeve van distributie-automatisering, ter vervanging en/of aanvulling van de centralistische concepten en de daartoe vereiste wetenschappelijke doorbraken te realiseren.

2.4 Werkwijze

Korte omschrijving van de activiteiten

De belangrijkste activiteit die binnen het project werd voorzien, was het uitvoeren van wetenschappelijk onderzoek, door een promovendus bij de vakgroep Electrical Energy Systems (TU/e). Projectpartner KPMG had al ervaring met data-science, (big) data engineering en ICT-architecturen in andere branches en deze kennis is ingebracht in dit onderzoeksproject. Enexis leverde data (netwerk- en meetgegevens) en leverde informatie over net-topologieën en de huidige, centralistische ICT-architectuur voor distributieautomatisering. De dagelijkse begeleiding van de onderzoeker werd verzorgd door de TU/e.

Meer in detail zijn de volgende activiteiten uitgevoerd:

1. Onderzoek naar de impact van de enorme toename van meetgegevens (grid data) voor datanetwerktopologieën van slimme netwerken, gedistribueerde en gedecentraliseerde dataprocessing en analyses (= federated analytics) en gebruikmakend van een hybride overlay connectiviteitsnetwerk met dynamische transmissiekarakteristieken, een gedeeld eigendom en gedecentraliseerd management;
2. Doorgronden en ontwikkelen van de fundamentele karakteristieken van een big data referentiearchitectuur met de mogelijkheden om analyse-algoritmen veilig te distribueren, te beheren en op IED-(Intelligent Electronic Device)-niveau decentraal dataprocessing en analyse uit te voeren;
3. Definiëren en ontwikkelen van een datakwaliteitsmodel, waarbij de data gegenereerd door een IED aan te onderzoeken kwaliteitscriteria voldoet om in combinatie met het analyse-algoritme tot betrouwbare resultaten te komen. Naar alle waarschijnlijkheid diende de data ook in een nog te standaardiseren formaat te worden aangeleverd en verder dient ook de data governance te worden geregeld.
4. Op basis van verkregen inzichten en fundamentele uitgangspunten het ontwikkelen van een big data referentiearchitectuur voor een hybride overlay connectiviteitsnetwerk met

bijbehorend 'operating model', gezien vanuit de rol en verantwoordelijkheid van de netbeheerder;

5. Het integreren van de resultaten van deze activiteiten in verbeterde reinforcement learning algoritmen voor beheer van een data gedreven elektriciteitsdistributienetwerken en slimme big data-architecturen. En vervolgens het testen en ontwikkelen van het prototype in het netwerk van Enexis worden getest en geverifieerd.

2.5A Resultaten van het project

Er is een literatuuronderzoek gedaan naar actuele ontwikkelingen op het gebied van datanetwerktopologieën en concepten voor big data aggregatie, processing en analyses in tijdkritische omgevingen [WP 1]. Daarnaast is er gewerkt aan het ontwikkelen van een big data referentiearchitectuur die het mogelijk maakte om op een gecontroleerde en veilige manier analysealgoritmen te distribueren [WP 2]. Verder zijn er verschillende benaderingen verkend om een algoritme te ontwerpen dat helpt bij het identificeren van foutieve gegevens van sensoren die op distributietransformatoren zijn geïnstalleerd [WP 3]. Er is vervolgens gewerkt aan het ontwerpen en testen van een architectuur om een batterij in een gebouw te besturen met behulp van machine learning-technieken [WP 4]. Als follow-up is er onderzoek gedaan naar het ontwerpen van een reinforcement learning algoritme om daarmee met succes een gemeenschapsbatterij te besturen [WP 5].

Concreet betekent het dat het project de volgende resultaten heeft opgeleverd;

- Literatuuronderzoek naar datanetwerktopologieën en concepten voor big data aggregatie, processing en analyses in tijdkritische omgevingen. (WP1)
- Big data referentiearchitectuur voor het gecontroleerd en veilig distribueren van analysealgoritmen. (WP2)
- Algoritme-ontwerp voor identificatie van foutieve sensordata uit bemeeten distributietransformatoren. (WP3)
- Architectuur-ontwerp voor besturen opslag-asset in gebouw o.b.v. Machine Learning technieken. (WP4)
- Ontwerp van leeralgoritme voor besturing van opslag-asset op buurtniveau. (WP5)

De (technische) details van deze resultaten worden onder andere beschreven in de publicaties zoals genoemd onder 3.4. De publicaties zelf kunnen uiteraard ook als resultaten worden gezien die voortvloeien uit het project.

2.5B Resultaten mogelijkheden voor spin-off en vervolgactiviteiten

Resultaten van het onderzoek tonen aan dat de datagedreven algoritmen (reinforcement learning) in staat zijn om een agent te kunnen trainen om te leren en bedienen de mogelijke bruikbare opslagapparaten. Deze apparaten zijn bijvoorbeeld huishoudelijke batterijen, thermische opslag of elektrische voertuigen. Dergelijke agenten worden offline getraind om vervolgens gedecentraliseerd te worden ingezet om de distributienetwerken te bedienen. Niettemin hangt de kwaliteit van de controle die de agent uitvoert sterk af van de simulatieomgeving waarop deze is getraind.

De kwaliteit van de simulatieomgevingen die nodig zijn voor het gedecentraliseerde raamwerk vereiste uitgebreid onderzoek naar datagedreven modellen die de onzekerheid in het verbruik van elektrische patronen (seizoensveranderingen), weersomstandigheden (zon

straling, temperatuur) konden vastleggen. Het onderzoeksproject leverde geavanceerde wiskundige modellen op om die onzekerheden in de simulatie incorporeren, vandaar kon de kwaliteit van de reinforcement learning agents verhoogd worden.

Bovendien werden simulaties versneld met nieuwe wiskundige formuleringen (op vermogensstroomanalyse). Dit om te checken of de status van het netbeheer binnen de technische limieten ligt tijdens het bedienen hiervan met de zelflerende agenten. Deze wiskundige formulering kan in de toekomst door netbeheerders worden gebruikt om uitgebreide scenariosimulaties uit te voeren voor planningsanalyse.

2.6 Discussie

De modellen die zijn ontwikkeld in het framework voor verbruik van elektriciteitspatronen en weersomstandigheden bleken gunstig te zijn voor nieuwe soorten analyses in het elektriciteitsnet, zoals bijvoorbeeld de impact van verschillende PV-controltechnologieën, ook bij de analyse en kwantificering van risico's voor technische problemen in het net door nauwkeurige simulatie van weersomstandigheden. Een toekomstig onderzoek zou zijn om de toepassingen ervan te exploiteren voor netplanning en operation.

Er moet nog onderzoek gedaan worden op het gebied van reinforcement learning algoritmen die in het framework worden gebruikt, om ze efficiënter te laten leren, met minder gegevens (minder vereiste simulaties) en met een hogere leersnelheid. De coördinatie tussen agenten is nog steeds een interessant onderzoeksgebied, omdat het de samenwerking tussen agenten kan gebruiken om netwerkproblemen op te lossen, bijvoorbeeld congestiebeheer.

2.7 Conclusie en aanbevelingen

Het project heeft een eerste framework voor decentrale distributie-automatisering opgeleverd en getest. Het samenstel van voornoemde decentrale architecturen en algoritmen blijkt te werken en is complementair aan de huidige centralistische architectuur. Conclusie is dan ook dat de doelstellingen van het project behaald zijn en het project succesvol afgerond is.

3 Uitvoering van het project

3.1 Technische en organisatorische problemen en oplossingen daarvan

Het project is technisch voorspoedig verlopen; er hebben zich op dat vlak geen noemenswaardige zaken voorgedaan.

Wel heeft zich organisatorisch een wijziging voorgedaan waarover periodiek met het TKI is gecommuniceerd.

In 2019 heeft de medewerker die oorspronkelijk vanuit KPMG betrokken was bij dit project zijn dienstverband opgezegd. Het bleek lastig om in korte tijd een volwaardige vervanger te vinden. Als gevolg hiervan was de financiële bijdrage van KPMG destijds teruggebracht tot 1/4 van het oorspronkelijk voorziene bedrag. Het ontstane gat in de financiering is vervolgens door Enexis aangevuld, zodat de voortgang van het project niet in gevaar kwam en de financiële begroting als geheel ongewijzigd bleef. Het aantal uren van KPMG werd als gevolg van deze ontwikkeling daarnaast ook significant gereduceerd. Er is destijds met KPMG afgesproken dat de promovendus

met materie deskundigen van KPMG in gesprek ging en hij op elk gewenst moment met (inhoudelijke) vragen terecht kon bij deze personen. De voorziene rol van KPMG is overgenomen door Enexis en door de TU/e, die eveneens beschikten over de kwalificaties om hieraan invulling te geven. Bovenstaande heeft dan ook geen effect gehad op de aard, voortgang, inhoud of het welslagen van het project.

3.2 Toelichting op wijzigen t.o.v. projectplan

Hoewel het volgende niet zozeer een wijziging is ten opzichte van het plan, willen wij dit nader toelichten, gezien daar eerder ook een vraag over is geweest. Het gaat om de keuze die gemaakt is voor het aansturen van een batterij als decentrale asset.

De keuze voor het besturen van batterijen is een nadere toespitsing van het onderzoeksonderwerp. Zoals de projectbeschrijving aangeeft, is het onderzoeksdoel *om het gebruik van de gedecentraliseerde ICT-architectuur om het net te besturen te onderzoeken*. Een dergelijk regelconcept moet worden toegepast op daadwerkelijke applicaties om de mogelijkheden en de toegevoegde waarde inzichtelijk te maken. De keuze voor het aansturen van accu's bij individuele klanten is gemaakt omdat de verwachting is dat (bijv. wanneer de salderingsregeling zou worden afgeschaft) accu's zullen worden toegepast bij individuele klanten, dat is in het buitenland ook reeds gebleken. De concepten die worden ontwikkeld zijn in principe echter ook toepasbaar voor andere regel-/stuurbare toepassingen, zoals elektrische auto's en warmtepompen.

Het gaat hierbij dus niet zozeer om een wijziging ten opzichte van het projectplan, maar een logische en praktijk- c.q. toekomstgerichte toespitsing daarvan.

3.3 Toelichting verschillen begroting en werkelijke kosten

Zoals in een mail d.d. 17-11-2021 al aangegeven door de heer Slootweg is de inzet van KPMG binnen dit project verminderd qua aantal uren. Dit heeft gevolgen voor de hoogte van de in-kind bijdrage van KPMG gehad, maar niet voor de inhoud, aard en resultaten van het project. De kosten van TU/e zijn iets hoger en die van Enexis iets lager uitgekomen dan begroot. Dit zijn echter geen significante verschillen.

3.4 Toelichting wijze van kennisverspreiding

De kennis en resultaten zijn op een aantal manieren verspreid.

Er zijn drie presentaties gegeven op twee grote conferenties voor de elektrische energiegemeenschap:

1. Panelist voor de Power Energy Society (PES) General Meeting 2022, Denver, Colorado (July 2022). Panel session: "Advanced Applications of Modern Optimization and Artificial Intelligence Methods on Active Distribution Networks."
2. Presentatie tijdens de PES General Meeting 2022, Denver, Colorado. Presentation: "Conditional Multivariate Elliptical copulas to model residential load profiles from smart meter data".
3. Presentatie tijdens de Power System Computation Conference (PSCC) 2022, in Porto, Portugal (July 2022). Community Energy Storage Operation via Reinforcement Learning with Eligibility Traces "

Daarnaast zijn er meerdere bijeenkomsten gehouden op de TU Delft om de Reinforcement learning onderwerpen te bespreken met de groep Intelligent Electrical Power Grids (IEGP) met Prof. Pedro Pablo Vergara.

Tenslotte is er een bovengemiddeld aantal publicaties verschenen over het project:

Duque, E. M. S., Vergara, P. P., Nguyen, P. H., van der Molen, A. & Slootweg, J. G. (2021). Conditional Multivariate Elliptical Copulas to Model Residential Load Profiles From Smart Meter Data. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(5), 4280–4294. <https://doi.org/10.1109/tsg.2021.3078394>

Giraldo, J. S., Salazar, M., Vergara, P. P., Tsaousoglou, G., Slootweg, J. & Paterakis, N. G. (2021). Optimal Operation of Community Energy Storage using Stochastic Gradient Boosting Trees. *2021 IEEE Madrid PowerTech*. <https://doi.org/10.1109/powertech46648.2021.9495010>

Mai, T. T., Salazar, M., Haque, N. A. & Nguyen, P. H. (2020). Stochastic modelling of the correlation between transformer loading and distributed energy resources in LV distribution networks. *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, 2020(1), 480–483. <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2021.0095>

Rouwhorst, G, Duque, E. M. S. , Nguyen, P. H., and Slootweg, H. Improving Clustering-Based Forecasting of Aggregated Distribution Transformer Loadings With Gradient Boosting and Feature Selection. *IEEE Access*, vol. 10, pp. 443-455. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3137870>

Salazar, M., Giraldo, J. S., Vergara, P. P., Nguyen, P., van der Molen, A., and Slootweg, H. (2022). “Community energy storage operation via reinforcement learning with eligibility traces”. *Electric Power System Research*. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108515>

Salazar, M., Dukovska, I., Nguyen, P. H., Bernardis, R. & Slootweg, H. J. (2020). Data Driven Framework for Load Profile Generation in Medium Voltage Networks via Transfer Learning. *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*. <https://doi.org/10.1109/isgt-europe47291.2020.9248753>

Vergara, P. P., Salazar, M., Giraldo, J. S. & Palensky, P. (2022). Optimal dispatch of PV inverters in unbalanced distribution systems using Reinforcement Learning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 136, 107628. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107628>

Vergara, P. P., Salazar, M., Mai, T. T., Nguyen, P. H. & Slootweg, H. (2020). A comprehensive assessment of PV inverters operating with droop control for overvoltage mitigation in LV distribution networks. *Renewable Energy*, 159, 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.151>

3.5 Toelichting PR project en verdere PR mogelijkheden

De promovendus zal naar verwachting in dienst treden bij projectpartner Enexis om daar te gaan werken aan de doorontwikkeling en implementatie van de door hem ontwikkelde concepten en oplossingen. Vanuit Enexis zullen ook de andere netbeheerders daarbij worden betrokken binnen het kader van de bestaande samenwerking in de branchevereniging Netbeheer Nederland. De impact van de resultaten zal daardoor worden vergroot.

Bijlage 1 - Beschrijving KPI's

KPI	Omschrijving
TRL bij start	2
TRL bij afsluiting	4
Vervolg	Vervolgonderzoek gericht op toepassing modellen voor exploitatie inzake netplanning en operation (implementatie)
Aantal verwachte peer-reviewed publicaties	1 (proefschrift), geen concrete verwachting geformuleerd qua aantal journal en conference papers.
Aantal gerealiseerde peer-reviewed publicaties	8 <ul style="list-style-type: none"> - https://doi.org/10.1109/tsg.2021.3078394 - https://doi.org/10.1109/powertech46648.2021.9495010 - https://doi.org/10.1049/oap-cired.2021.0095 - https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3137870 - https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108515 - https://doi.org/10.1109/isgteurope47291.2020.9248753 - https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107628 - https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.151
Aantal gerealiseerde niet-peer-reviewed publicaties	0
Aantal aangevraagde patenten	0
Aantal verleende licenties	0
Aantal prototypes	1 Er is een prototype leeralgoritme voor beheer van een big data referentiearchitectuur voor hybride overlay connectiviteitsnetwerk ontwikkeld en getest.
Aantal demonstrators	0
Aantal spin-offs/ spin-outs	0
Aantal nieuwe of verbeterde producten/ processen/ diensten geïntroduceerd	1 Het werkingsprincipe van het proces van aansturing van een batterij in een gebouw door een leeralgoritme op basis van de (decentrale) data uit de buurt van deze batterij is aangetoond.
Impact	Zie openbare samenvatting.