

TNO PUBLIEK

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
Postbus 15
1755 ZG Petten

www.tno.nl

T +31 88 866 50 65

TNO-rapport

2020 R11461 | Eindrapport

Openbaar eindrapport WT Brain

Datum 29 september 2020

Auteur(s) Engels, W.P.,

Exemplaarnummer

Oplage

Aantal pagina's 5 (incl. bijlagen)

Aantal bijlagen

Opdrachtgever RvO

Projectnaam WT Brain

Projectnummer 060.33834

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2020 TNO

TNO PUBLIEK

1 Openbare eindrapportage Wind Turbine Brain

Inleiding, achtergrond en doel

Dit is het openbare eindrapport van het onderzoeksproject Wind Turbine Brain (WT Brain). In dit project is door TNO, de Technische Universiteit Delft en de Nederlandse windturbinebouwer Lagerwey Wind, gedurende twee en een half jaar, onderzoek gedaan naar het toepassen van Machine Learning (ML) en Artificial Intelligence (AI) in de regelstrategie van een windturbine.

Die regelstrategie beslist hoe de windturbine reageert op veranderingen in de wind en bepaalt mede hoe efficiënt de windturbine de bewegingsenergie van de wind omzet in elektrische energie. Het is vooral belangrijk om dat zo goed mogelijk te doen bij lage windsnelheden. Bij hoge windsnelheden, wordt het ook steeds belangrijker om de krachten op de bladen en op de toren van de windturbine goed te regelen. Als die krachten minder worden, kan een windturbine ook lichter en goedkoper gebouwd worden. Verbeteringen in de windturbine en de ondersteuningsconstructie zijn namelijk nog steeds de grootste bron van kostenreducties in windenergie (Vree & Verkaik, 2017).

Het doel van het WT Brain-project is om ontwerpers te helpen sneller, betere regelaars te ontwikkelen. Hierbij willen we enerzijds een betere regelaarstructuur ontwikkelen en anderzijds het tunen van de regelaar makkelijker maken. Die verbeteringen moeten dan resulteren in lagere krachten op de bladen en de toren. Er is op drie speerpunten ingezet:

- Het verbeteren van de structuur van de bestaande regelaar, door het model te verbeteren dat de regelstrategie intern gebruikt.
- Het gebruik van ML technieken om bestaande regelstructuren beter te optimaliseren en het ontwerp inzichtelijker te maken.
- Het gebruik van kunstmatige netwerken (ook wel: Artificial Networks (AN)) als vervanging van de bestaande regelstructuren.

De verwachting was dat we de ontwerpbelastingen op de bladen 5% tot 10% konden verlagen en de belastingen op de toren tot 5%, bij gelijkblijvende energieproductie. Deze reducties zullen de kosten van een windturbine tot 5% verlagen, wat resulteert in een kostenreductie van windenergie (Levelised Cost of Energy, LCoE) tot 2%.

2 Resultaten en verbeterpunten

2.1 Resultaat

Bij het toepassen van ML bleek Bayesian optimalisatie (BO) erg geschikt. BO houdt namelijk uitdrukkelijk rekening met ruis en/of onzekerheid, en dat is er bij een windturbineontwerp. Al gauw bleek ook dat, als we BO toepassen op de regeling en naar één doel optimaliseren, het moeilijk wordt om een goede vergelijking te maken met de bestaande regelstructuur. Optimaliseren naar meerdere doelen (Multi-objective, MO) is daar meer geschikt voor. Bij MO-optimalisatie wordt er gezocht naar alle oplossingen die een beste combinatie vormen van de verschillende doelen. De combinatie van BO- en MO-optimalisatie blijkt een handig gereedschap in het ontwerp van de regeling.

De doelen die gebruikt werden zijn het gemiddelde vermogen van de windturbine, de belastingen op de bladen en de toren en de moeite die het kost om de bladen te verstellen.

MO-BO levert natuurlijk meerdere oplossingen die uitblinken op deze doelen en op de raakvlakken. Uit de oplossingen werd er één gekozen, die een grote verlaging op de torenbelasting van de windturbine (10% verlaging) realiseerde, en in iets mindere mate op de belasting op de windturbinebladen (4%), terwijl er ook 10% minder moeite gestopt hoeft te worden in het verstellen van de windturbinebladen. Dit resultaat werd behaald voor windsnelheden tussen de 14-23 meter per seconde. Als deze regeling robuust toegepast kan worden, is het te verwachten dat het doel van een kostenreductie van 2% ruim gehaald kan worden.

2.2 Verbeterpunten voor verder onderzoek

Robuustheid van de nieuwe regelaarstructuur

Hoewel de regelaar goede resultaten biedt, zitten er in simulaties rond de nominale windsnelheid (de laagste windsnelheid waarbij de wind turbine het maximum vermogen levert) nog fouten in het gedrag waardoor dezelfde verlagingen in de belastingen niet tot uiting komen. Ook bij hele hoge windsnelheden (vanaf 20 meter per seconde) gebeurt dat nog. We verwachten dat deze problemen relatief eenvoudig te corrigeren zijn.

Daarnaast is het belangrijk om een zoveel mogelijk sluitend bewijs te leveren dat de nieuwe regelaar robuust stabiel is. Dit zal namelijk de toepassing ervan in echte wind turbines vereenvoudigen.

Het toepassen van AN

Het andere doel van het project was het toepassen van AN in de regelaarstructuur, dit bleek op delen haalbaar en succesvol, bijvoorbeeld als schatting van de windsnelheid, maar voor het vervangen van de complete regeling bleek dit helaas nog niet haalbaar.

3 Bijdrage aan doelstellingen en perspectief voor toepassing

3.1 Bijdrage aan doelstellingen

De verlaging van de structurele krachten maken het mogelijk lichter en goedkoper te gaan ontwerpen. Dit draagt bij aan kostenverlagingen bij het toepassen van windenergie en versterkt daardoor de toekomstige duurzame energiehuishouding in Nederland en daarbuiten.

3.2 Perspectief voor toepassing, binnen en buiten de sector.

De nieuwe regelaarstructuur zal, nadat het gedrag rond nominale en bij hoge windsnelheden verbeterd is, beschikbaar komen voor de windenergiesector. Verder onderzoek en publicaties zullen bijdragen aan de toepasbaarheid.

MO-BO is een zeer handig gereedschap in de optimalisatie van windturbine Regelstrategieën en is bij de projectpartners goed bevallen. Binnen de onderzoeksgroep windenergie van TNO wordt dit gereedschap ook al op andere vlakken toegepast, zoals op het ontwerp van vleugelprofielen (aerofoils). Omdat MO-BO toepasbaar is op eigenlijk alle terreinen waarbij metingen met ruis of onzekere processen spelen, is de verwachting dat MO-BO op veel meer terreinen toegepast gaat worden.

3.3 Overzicht van publicaties over het project

De volgende publicaties zijn dankzij of mede dankzij het project WT Brain tot stand gekomen:

Ritsma, F.R. "Report on the Application of Machine Learning for Wind Turbine Control" TUD report, 2019

Moustakis, N. Mulders, S.P. Kober, J. and van Wingerden, J.W. "A Practical Bayesian Optimization Approach for the Optimal Estimation of the Rotor Effective Wind Speed", American Control Conference, 2019.

Ritsma, F.R. "Approximate Dynamic Programming for Optimal Wind Turbine Control", to be submitted, 2020

Mulders, S.P., A.K. Pamososuryo, and J.W. van Wingerden, "Efficient tuning of Individual Pitch Control: A Bayesian Optimization Machine Learning approach" The science of making torque from wind, Delft, 2020

Mulders, S.P., "Wind turbine control: advances for load mitigations and hydraulic drivetrains", Ph.D. thesis, Delft, 2020

Engels, W.P., Van der Hoek, D., Yu, W., Reyes Baez, R., "Scheduled state feedback control of a wind turbine" , The science of making torque from wind, Delft, 2020

Yu, W., Engels, W.P., Stock-Williams, C.F.W., "A Comparison of Multi-Objective Optimisation of Two Wind Turbine Controller Designs", The science of making torque from wind, Delft, 2020

Stock-Williams, C.F.W., Yu, W., and Engels W.P., "Multi-objective Bayesian Optimisation of Wind Turbine Controller Parameters" presented at MOPGP 2019 conference, Marrakech, Morocco, 2019

Stock-Williams, C.F.W, Chugh, T., Rahat, A., Yu, W. "What Makes an Effective Scalarising Function for Multi-Objective Bayesian Optimisation?" Submitted to OR Spectrum, 2020

Deze lijst zal ook vermeld worden op de website www.WTBrain.nl.

3.4 Contact personen en verdere kosten

Bij vragen, kunt u contact opnemen met TNO Energietransitie, onderzoeksgroep Windenergie, of direct met Wouter Engels.

Dit rapport is gratis te downloaden van de TNO website.

3.5 Verkregen subsidie

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland