

**TNO report**

**TNO 2019 R11700 | Final report**  
**Large Offshore Wind Harmonics Mitigation**  
**(LOW-HarM) - Final summary report**

**ECN Part of TNO**

Westerduinweg 3  
1755 LE Petten  
P.O. Box 15  
1755 ZG Petten  
The Netherlands

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 50 65

Date	30 October 2019
Author(s)	ECN part of TNO (H.J. van der Mijle Meijer, E.J. Wiggelinkhuizen), TenneT TSO B.V., Energy Watch B.V., CG Holdings Belgium N.V., Energy Solutions B.V., Delft University of Technology, Eindhoven University of Technology
Nr. of pages	9
Nr. of appendices	-
Customer	RvO / TKI WoZ R&D
Project name	LOW-HarM
Project number	TEWZ117001

All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced and/or published by print, photoprint,  
microfilm or any other means without the previous written consent of TNO.

Netherlands Enterprise Agency, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, RVO, has got  
permission from TNO to publish this report on the RVO website.

© 2019 TNO

## Contents

<b>1</b>	<b>Samenvatting .....</b>	<b>3</b>
1.1	Inleiding .....	3
1.2	Doelstelling .....	3
1.3	Resultaten.....	3
1.4	Conclusies en aanbevelingen met betrekking op huidige ontwerpmethodiek .....	4
1.5	Aanbevelingen met betrekking op vervolgonderzoek.....	5
<b>2</b>	<b>Summary .....</b>	<b>6</b>
2.1	Introduction .....	6
2.2	Project goal.....	6
2.3	Project results .....	6
2.4	List of publications .....	7
2.5	Conclusions and recommendations on the current design methodology.....	7
2.6	Recommendations on future research .....	8
<b>3</b>	<b>Project data .....</b>	<b>9</b>

# 1 Samenvatting

## 1.1 Inleiding

De implementatie van de energietransitie zoals vastgelegd in het Nederlandse klimaatakkoord zal leiden tot een sterke groei van hernieuwbare energieopwekking, waarin wind op zee een groot aandeel heeft. De inpassing van deze extra duurzame energieopwekking zal tot aanzienlijke aanpassingen leiden in zowel het transmissienet als de distributienetten. De Nederlandse Netcode schrijft onder meer voor aan welke eisen moet worden voldaan om de spanningskwaliteit te kunnen garanderen. Zo moet de emissie van harmonische stromen van de aangesloten partijen onder de vastgestelde limieten blijven om verstoring van andere gebruikers te voorkomen. De netbeheerders zijn verantwoordelijk voor de spanningskwaliteit op alle aansluitpunten in het door hen beheerde net.

Offshore windparken worden veelal aangesloten met lange onderzeese en ondergrondse kabels, waardoor versterking kan optreden van harmonische spanningen die reeds in het landelijke net aanwezig zijn, veroorzaakt door emissies van aangesloten partijen. Daarnaast leidt de vervanging van thermische elektriciteitscentrales door duurzame opwekkers die invoeden via vermogens-elektronische omzetters, zoals wind op zee, waarschijnlijk tot een toename van harmonische emissies. Internationaal is er nog geen uniforme, praktisch toepasbare methodiek voor het kwantificeren van de impact van nieuw aangesloten installaties en wijzigingen van het elektriciteitsnetwerk op de harmonische spanningskwaliteit.

Deze factoren dragen bij aan de toenemende onzekerheid in het vooraf inschatten van potentiële problemen gerelateerd aan harmonischen in de interactie tussen aangesloten offshore windparken en het transmissienet.

## 1.2 Doelstelling

Doel van het project “Large offshore Wind Harmonics Mitigation” (LOW-HarM) is het ontwikkelen van een ontwerpmethodologie voor offshore windparken en het offshore transmissiesysteem die leidt tot oplossingen op maat die nadelige effecten ten gevolge van harmonischen verminderen dan wel voorkomen.

## 1.3 Resultaten

In het project zijn de volgende drie zaken in kaart gebracht als basis voor het onderzoek: (1) scenario's en trends gerelateerd aan de groei van offshore wind, (2) overzicht van kennis en ervaringen uit de literatuur ten aanzien van harmonischen in elektriciteitsnetten en vermogens-elektronische omzetters en (3) de door de industrie toegepaste werkwijze voor het ontwerp en de harmonische analyse van offshore windparken. Hieruit zijn onderzoeksvragen geformuleerd, die zijn beantwoord door middel van literatuuronderzoek, analyses en simulaties. Deze hebben geresulteerd in de volgende conclusies en aanbevelingen, gericht op mogelijke verbeteringen in de huidige analyse- en ontwerpmethododes.

#### 1.4 Conclusies en aanbevelingen met betrekking op huidige ontwerpmethodiek

De hoofdconclusie van dit project is dat de huidige procedure ten aanzien van harmonischen, zoals vereist voor de aansluiting van offshore windparken op het elektriciteitsnet, in overeenstemming is met de internationale praktijk en de recente inzichten uit de wetenschappelijke literatuur.

De nauwkeurigheid van de analyses en modellen die worden toegepast in deze procedure kan echter worden verbeterd door de volgende werkwijzen:

- Door een meer gedetailleerde representatie van elektriciteitsnetwerken voor distributie op lagere spanningsniveaus kan het elektriciteitsnet op het aansluitpunt van het offshore windpark nauwkeuriger worden gemodelleerd;
- Het is bevestigd dat de frequentie-afhankelijke impedantie van de kabel van het offshore transmissienet in detail moet worden gemodelleerd vanwege het grote effect hiervan op de resultaten van de harmonische studies;
- Uit de uitgevoerde simulaties is gebleken dat het proximity effect van de transmissiekabel een significante invloed heeft op de resultaten vanaf de 11e orde harmonische voor de betreffende case;
- Zolang de transmissie kabel nog niet is gespecificeerd dient rekening gehouden te worden met een aanzienlijke onzekerheidsmarge op de capaciteit per km. Typische variaties kunnen oplopen tot 25 %, afhankelijk van de fabrikant. Voor een reeds gespecificeerde kabel zijn de te verwachten variaties ca. +/- 8%;
- Het is aan te bevelen om altijd gebruik te maken van het harmonischen model, bestaand uit emissie- en impedantie-spectra, dat wordt aangeleverd door de windturbine fabrikant;
- Als de fabrikant nog niet bekend is kunnen modellen van windturbines met een vergelijkbare vermogensklasse worden gebruikt. Harmonischen modellen worden als één geheel aangeleverd: emissie- en impedantie-spectra, en het is niet aan te bevelen om modellen van verschillende fabrikanten in combinatie te gebruiken, deze te middelen of de worst-case waarden te gebruiken, om onrealistische uitkomsten te voorkomen;
- Als de fabrikant nog niet bekend is kunnen emissie- en impedantie-spectrum analytisch worden bepaald, waarbij dit slechts een benadering is doordat diverse fenomenen niet zijn meegenomen in deze analyse;
- Zowel uit de literatuur als de industrie komt dat de methode van aggregeren van harmonische emissies van windturbines niet nauwkeurig is. Daarom is het nodig om een nieuwe methode te ontwikkelen waarin de onderlinge faseverschillen correct worden meegenomen, en die is gevalideerd met behulp van metingen in een offshore wind park met een voldoende groot aantal wind turbines;
- In het geval dat harmonische limieten worden overschreden, moeten zowel passieve als actieve beheersingsmaatregelen worden beschouwd. Voor actieve meetregelen kan het analytische windturbine model worden toegepast om de impedantiecurves aan te passen aan een specifiek wind park ontwerp. Met deze curves kunnen verbeteringen worden aangetoond ten aanzien van het voorkomen van harmonische versterking, waarbij medewerking van de fabrikant noodzakelijk is voor de implementatie;

## 1.5 Aanbevelingen met betrekking op vervolgonderzoek

Met de groei van het aantal offshore windparken is het belangrijk om beter inzicht te krijgen in de sommatie van de verschillende harmonische emissies, zowel op het niveau van individuele windturbines als windparken.

- Omdat het meten van harmonische emissies in windparken zeer moeilijk is en het niet mogelijk is om de bijdragen vanuit het windpark en vanuit het transmissienet van elkaar te onderscheiden, zou als alternatief voor een laboratoriumopstelling met parallel geschakelde inverters kunnen worden gekozen. Een moeilijkheid daarbij is dat een groot aantal inverters is benodigd om het effect van versterking dan wel uitdoving van harmonische bijdragen in windparken adequaat te kunnen bestuderen.
- Hoewel de eerste toepassingen van actieve harmonischen onderdrukking door converters al bekend zijn, is het nodig om, in samenwerking met fabrikanten, meer generieke en gevalideerde oplossingen te ontwikkelen.
- Bij harmonische emissie van inverters ten gevolge van frequentie koppeling heeft de fase-hoek naar verwachting een niet-deterministisch karakter. Voor de gecombineerde harmonische emissie van meerdere inverters kan dit zowel leiden tot versterking als uitdoving, wat nader onderzoek behoeft.
- Hoewel niet vereist in de huidige Nederlandse Netcode, is de studie van harmonische stabiliteit relevant voor windpark ontwikkelaars om daarmee risico's te verminderen ten gevolge van niet-optimale prestaties.

## 2 Summary

### 2.1 Introduction

The implementation of the energy transition as described in the Dutch Climate Agreement will result in strong growth of renewable generation in the coming years. The Netherlands primarily focuses on offshore wind as the main contributor to renewable energy generation. These changes will have a significant impact on the Dutch transmission and distribution grids. The Grid Code specifies power quality requirements with regard to the harmonic distortion limits at the Point of Common Coupling (PCC) of connections in order to avoid disturbances of other connectees. It is the responsibility of the network operators to ensure compliance to voltage disturbance limits at all at these nodes.

Most new Offshore Wind power Plant (OWPP) connections will include significant sub-sea and underground cable lengths, which can lead to amplification of harmonic background voltages that are already present in the grid. In addition, the foreseen reduction of conventional thermal generation and the increase of OWPPs that are connected to the grid through power-electronic converters may result in higher harmonic emission levels. There is yet no international methodology to assess the impact of new connections and changes to the network on the harmonic distortion that is standardized, widely accepted and practical at the same time.

These factors contribute to the growing uncertainty in predicting potential harmonics issues between OWPPs and the transmission grid in the design stage.

### 2.2 Project goal

The objective of this project “Large offshore Wind Harmonics Mitigation” (LOW-HarM) is to develop a methodology to design lean measures to mitigate adverse effects of harmonics in the electrical infrastructure of offshore wind energy. In a broader context, the objective is to increase reliability and to reduce costs of the electrical infrastructure of offshore wind energy.

### 2.3 Project results

The project has been based on three elements: (1) identifying the trends and scenarios for growth of offshore wind, (2) a literature study to understand the current level of knowledge related to harmonics in power systems and (3) documenting the current industry practice for harmonic analysis. This in turn has led to the identification of knowledge gaps and the formulation of relevant research questions, which have been answered by means of literature study, analyses and simulations. As a result the following conclusions and recommendations are stated as possible ways for improving the currently used methodology.

## 2.4 List of publications

- L. Beloqui Larumbe, Z. Qin and P. Bauer, "Introduction to the Analysis of Harmonics and Resonances in Large Offshore Wind Power Plants," in 2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 2018.
- G. Ye, V. Cuk, S. Cobben and J. v. Waes, "Downstream Network Modeling with Generalized," under review, IEEE PES Transactions on Power Delivery, 2019
- G. Ye, A. S. Ibos, V. Cuk, J. v. Waes and S. Cobben, "Impact of Distribution Network Modelling on Harmonic Impedance in the HV Grid," in CIRED, Madrid, Spain, 2019.
- G. Ye, J. v. Waes, V. Cuk, L. B. Larumbe and S. Cobben, "Parameter analysis on the Harmonic Amplification for Offshore Wind Power Plants: a Case Study in the Netherlands," Under review, 2019.
- L. Beloqui Larumbe, Z. Qin and P. Bauer, "Output Impedance Modelling and Sensitivity Study of Grid-Feeding Inverters with Dual Current Control," in IEEE 45th Annual Conference of the Industrial Electronics Society (IECON 2019), 2019
- L. Beloqui Larumbe, Z. Qin and P. Bauer, "Type IV Wind Turbine System Impedance Modelling for Harmonic Analysis: On the Use of a Double Synchronous Reference Frame and Notch Filter," in 17th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants, Stockholm, Sweden, 2018
- L. Beloqui Larumbe, Z. Qin and P. Bauer, "Introduction to the Analysis of Harmonics and Resonances in Large Offshore Wind Power Plants," in IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Budapest, Hungary, 2018.

## 2.5 Conclusions and recommendations on the current design methodology

The main conclusion of this project is that the current harmonics assessment procedure for the connection of offshore wind farms in the Netherlands is in accordance with the state of the art international standards and literature.

It was found that the accuracy of the analysis and modelling that is applied within this procedure can be improved with the following practices:

- The downstream networks of distribution network operators should be represented in more detail in order to improve the accuracy of the transmission system model at the OWPP connection point;
- It was confirmed that the frequency dependent impedance of the offshore transmission system cable needs to be included with a high level of detail due to its significance on results;
- Based on the executed simulations, it was found that the proximity effect of the transmission cable may have a significant influence on the results for frequencies above the 11th harmonic order for the considered case;
- If the cable type of the offshore transmission system is not specified during the evaluation process, the uncertainty of the capacitance per kilometer shall be

- included/considered. Typical deviations can be up to 25 % depending on the manufacturer. In case the type is specified, this value can be reduced to +/- 8 %;
- It is recommended to always use the harmonic model, including the emission spectrum and impedance, provided by a specific wind turbine generator (WTG) manufacturer;
  - If the manufacturer is not known, the model of other WTGs with similar output power range should be used. Harmonic models provided by manufacturers come as a unit, and it is not recommended to take the impedance from one manufacturer and the emission from another, nor to mix/average/take-worst-value of the emission at different harmonic orders from different manufacturers, in order to prevent unrealistic results;
  - If no WTG model from manufacturers is available, then the emission spectrum and impedance can be derived analytically, although results should be handled with care since several phenomena are neglected in this derivation;
  - According to the literature and industry experience the current methodology for aggregating different harmonic emissions of WTGs is not accurate. Therefore a new methodology needs to be developed (e.g. phase-correct aggregation) and validated with measurements, ideally, in an OWPP with a significant number of WTGs.
  - In case of a non-compliance, both passive and active mitigation measures should be considered. For the latter, the WTG analytical model can be used to generate different WTG impedance curves suitable to the specific wind farm project. These curves can be used to estimate potential improvements on the amplification of harmonics. Implementation requires collaboration with the manufacturers;

## 2.6 Recommendations on future research

As the number of OWPPs will increase, more insight is required in the summation of various harmonic emission contributions. This concerns both the offshore grid (aggregation of individual WTGs) and the onshore grid (aggregation of multiple OWPPs).

- Since measuring harmonics emission in a real OWPP is very difficult and it is impossible to decouple these from harmonics already present in the transmission grid, an alternative would be to study the aggregation effects in a laboratory set up with several converters in parallel. However, in order to properly study cancellation effects, a significant amount of units need to be interconnected, which might not be possible in a laboratory environment.
- Although the first converter-based solutions have to reduce the harmonic amplification in OWPPs already been applied, generally applicable and validated mitigation measures still need to be established. For this, collaboration with converter manufacturers is needed.
- The emission resulting from frequency coupling effects is expected to have a non-deterministic phase. Thus, cancellation or amplification effects of these harmonics are expected on the wind-farm level, which requires further study.
- Although not yet required for compliance with the Dutch grid code, studying harmonic stability in order to mitigate risks of underperformance is of interest to the wind farm owner.





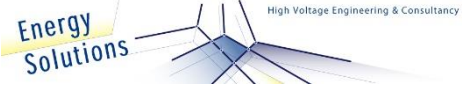




### 3 Project data

The project Large Offshore Wind Harmonics Mitigation (LOW-HarM) is supported by the Dutch Enterprise Agency of the ministry of Economic Affairs and Environment.

Project reference : TEWZ11701  
 Project title : Large Offshore Wind Harmonics Mitigation - LOW-HarM  
 Coordinator : ECN part of TNO  
 Partners : TenneT TSO B.V. (TenneT)  
                   CG-Power Systems (part of CG Holdings Belgium)  
                   Energy Solutions B.V. (EnSol)  
                   Eindhoven University of Technology (TU/e)  
                   Delft University of Technology (TU-Delft)  
 Project period : 15 June 2017 – 30 September 2019

The project consortium are listed below:

Consortium partner	Role	
ECN part of TNO	Coordinator	 ECN   TNO innovation for life
TenneT TSO B.V.	Partner	 TenneT Taking power further
Energy Watch B.V.	Subcontractor	 ENERGY WATCH
CG Holdings Belgium N.V.	Partner	 CG Power Solutions
Energy Solutions B.V.	Partner	 Energy Solutions High Voltage Engineering & Consultancy
Eindhoven University of Technology	Partner	 TU/e Technische Universiteit Eindhoven University of Technology
Delft University of Technology	Partner	 TU Delft

The project team kindly acknowledges Windpark Fryslân for providing preliminary design information as a basis for study case B.