

Lehrstuhl für Kommunikationsnetze  
Prof. Dr.-Ing. C. Wietfeld

## **Co-Simulation Based Performance Evaluation of ICT Infrastructures for Smart Grids**

Genehmigte Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Dortmund

von  
Dipl.-Ing. Kai Hanno Georg  
aus  
Bochum

Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz
Dissertation eingereicht am:	11.02.2015
Tag der mündlichen Prüfung:	10.06.2015



Dortmunder Beiträge zu Kommunikationsnetzen und -systemen

Band 10

**Kai Hanno Georg**

**Co-Simulation Based Performance Evaluation  
of ICT Infrastructures for Smart Grids**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag  
Aachen 2015

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3824-8

ISSN 1867-4879

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Abstract

The traditional electrical transmission system is currently fundamentally changing towards a more intelligent network, the so called smart grid. This change is caused by both, an increasing number of decentralized, renewable energy (including photovoltaic, wind energy, etc.) and controllable loads with high demands (including electric vehicles, combined heat and power generation, etc.). For the power system this change is accompanied by the need for novel mechanisms, enabling both, real-time analysis of the system's state and intelligent adjustments of the power flow in order to guarantee power system stability at all times. For realizing such systems, an efficient and high-performance communication network is necessary, which can deliver the arising information quickly and reliable, even in case of emergencies.

For evaluating new protection and control systems, simulations are a common way to model the behavior of those systems, but, however, are only available for individual parts of the system. Especially with regard to smart grids, a combined evaluation becomes increasingly important to evaluate overlapping respectively mutual effects and to include the performance of the communication network, which strongly influences the efficiency of protection and control systems.

The goal of this thesis is the design and evaluation of a combined modeling approach taking into account both power system and communication network simulators. An essential base for this has been presented by introducing the so called *Hybrid Simulator Architecture* (HSA), which provides generic functionalities and has been used for implementing the *Integrated Co-Simulation of Power and ICT Systems for Real-Time Evaluation* (INSPIRE) co-simulator. Furthermore, in the context of this thesis, a generic approach for enabling inter-simulator communication has been proposed and illustrated, relying on communication protocols and data models common for substation automation systems to enable an evaluation, which is extensible for future enhancements. As time management has been identified as a critical requirement for co-simulators, this thesis especially pays attention to this and presents a detailed evaluation for the applied heterogeneous simulators. Here, results have shown, that the limited access regarding the continuous-time model of the power systems simulator can lead to the introduction of synchronization errors. These errors have been evaluated within this thesis and corresponding approaches for their minimization have been proposed.

The capabilities of a hybrid simulation environment, combining power system and communication network simulators, are highlighted by various case studies modeling different failure scenarios, illustrating the need for a joint reflection. Only this combined evaluation will enable the appropriate dimensioning of an efficient and reliable communication network infrastructure in future networks.

Results and approaches, developed in the course of this thesis, have been documented within more than 10 publications, which have been presented at international conferences as well as published as part of national and international journals. Finally, together with other associates of research unit 1511, the resulting simulator has been applied for patent and - due to its general approach - will be adopted for future research projects within the context of smart grids.



## Kurzfassung

Der Wandel im Bereich der elektrischen Energieübertragungsnetze von den traditionellen Netzen hin zu einem intelligenten Netz ("Smart Grid") wird weltweit durch die steigende Anzahl von dezentralen, erneuerbaren Energien (Photovoltaik, Windenergie, etc.), sowie die Zunahme an regelbaren Verbrauchern mit hohem Leistungsbedarf (Elektrofahrzeugen, Wärmepumpen, etc.) vorangetrieben. Damit einher geht die Notwendigkeit für neuartige Mechanismen, die eine automatisierte Analyse des Netzzustandes und eine intelligente Anpassungen der Leistungsflüsse ermöglichen, um so die Stabilität des Energienetzes zu jeder Zeit zu gewährleisten. Zur Umsetzung dieser innovativen Schutz- und Leittechnik sind leistungsfähige Kommunikationsnetze notwendig, die die im Notfall anfallenden Datenmengen zuverlässig und schnell transportieren.

Zur Bewertung neuer Schutz- und Leittechnikkonzepte werden hierbei zumeist Simulationen eingesetzt, die bisher jedoch lediglich die jeweiligen Spezialbereiche Energie- oder Kommunikationsnetz einzeln abbilden können. Insbesondere vor dem Hintergrund der zukünftigen, intelligenten Energienetze wird jedoch eine gemeinsame Betrachtung von Energie- und Kommunikationsnetz immer wichtiger, da übergreifende Effekte auftreten können und die Performanz des Kommunikationsnetzes die Effektivität der Schutz- und Leittechnik stark beeinflussen kann.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist der Entwurf und die Analyse einer gemeinsamen Modellierung und Simulation von Energie- und Kommunikationsnetz. Eine wesentliche Basiskomponente zur Integration verschiedener Simulatoren wurde hierbei im Rahmen der *Hybrid Simulator Architecture* (HSA) entwickelt, die die Realisierung der Simulationsplattform *Integrated Co-Simulation of Power and ICT Systems for Real-Time Evaluation* (INSPIRE) ermöglicht. Des Weiteren wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine generische Methode zur Realisierung der Inter-Simulator Kommunikation entwickelt, die auf offenen Kommunikationsprotokollen und Datenmodellen beruht und eine zukünftig erweiterbare Lösung bietet. Die zeitliche Synchronisation wurde weiterhin als entscheidende Anforderung identifiziert, die bei der Betrachtung von heterogenen Simulatoren speziell berücksichtigt werden muss. Hierbei führt insbesondere der eingeschränkte Zugriff auf zeitkontinuierliche Energienetzsimulatoren zu Synchronisationsfehlern, die im Verlauf der Arbeit detailliert analysiert und bewertet werden.

Anhand verschiedener Fallstudien zu unterschiedlichen Störfallszenarien werden die Möglichkeiten einer kombinierten Simulation von Energie- und Kommunikationsnetzen aufgezeigt und dabei die Notwendigkeit dieser gemeinsamen Betrachtung eindrücklich illustriert. Erst aus der gemeinsamen Betrachtung lässt sich eine angemessene Dimensionierung zuverlässiger Netzinfrastrukturen ableiten.

Die entstandenen Ansätze und Lösungen wurden in über 10 Veröffentlichungen auf internationalen Konferenzen, sowie Beiträgen zu nationalen und internationalen Journals publiziert. Auf Grund seiner generischen Ansätze, fließt das Simulationssystem direkt in weitere Forschungsprojekte ein und wurde - gemeinsam mit den Kollegen der Forschergruppe 1511 - zum Patent angemeldet.





# Contents

	Page
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>v</b>
<b>Contents</b>	<b>xi</b>
<b>List of Figures</b>	<b>xiii</b>
<b>List of Tables</b>	<b>xv</b>
<b>List of Abbreviations</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Smart Grid: an Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction . . . . .	2
1.2 Infrastructures for Smart Protection Systems . . . . .	6
1.2.1 Energy Infrastructures . . . . .	6
1.2.2 Information Infrastructures . . . . .	8
1.2.3 Communication Infrastructures . . . . .	9
1.3 Research Challenges in Smart Grids . . . . .	11
1.3.1 Research Challenges for Wide Area Monitoring Sys- tems . . . . .	12
1.3.2 Research Challenges for Wide Area Monitoring, Con- trol and Protection Systems . . . . .	13
1.3.3 Research Challenges for Cyber Physical Energy Sys- tems . . . . .	13
1.4 Problem Statement . . . . .	14
1.5 Research Methodology . . . . .	15
1.6 Contributions . . . . .	16
1.6.1 Proposal of a Generic Architecture for Co-Simulation ICT based Power System . . . . .	16
1.6.2 Proposal of a Power System based ICT Modeling Approach . . . . .	16
1.6.3 Proposal and Study of a Coupling Concept for Sim- ulators at Substation Level . . . . .	17
1.6.4 Design and Study of the Co-Simulation Framework INSPIRE . . . . .	17

1.6.5	Study of the Impact of Time Management . . . . .	18
1.6.6	Case Studies . . . . .	18
1.7	Outline . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Fundamentals on Smart Grid Communication</b>	<b>21</b>
2.1	Introduction . . . . .	21
2.2	Communication in Smart Grids . . . . .	22
2.2.1	Components at Generation and Transmission Domain	23
2.2.2	Requirements for Communication in Smart Grids . .	28
2.3	Communication Architectures . . . . .	29
2.3.1	Communication in Substation Networks . . . . .	30
2.3.2	Communication towards Control Center Networks .	31
2.4	Communication Protocols . . . . .	32
2.4.1	IEC 61850 . . . . .	33
2.4.2	IEEE C37.118 . . . . .	38
2.5	Communication Technologies . . . . .	38
2.5.1	Wired Technologies . . . . .	39
2.5.2	Wireless Technologies . . . . .	42
2.6	Conclusion . . . . .	46
<b>3</b>	<b>Hybrid Simulator Modeling Environments for Smart Grid System Simulations</b>	<b>47</b>
3.1	Introduction and Motivation . . . . .	48
3.2	Requirements and Challenges . . . . .	48
3.2.1	Power System Simulation . . . . .	49
3.2.2	Communication Network Simulation . . . . .	55
3.2.3	Integration Approaches for a combined Simulation .	57
3.2.4	Conclusion . . . . .	62
3.3	Related Work on coupling Smart Grid related Simulators .	64
3.3.1	Approaches applying an Ad-hoc Coupling . . . . .	64
3.3.2	Approaches applying a Simulation Middleware . . .	66
3.3.3	Summary of Related Work . . . . .	66
3.4	INSPIRE Hybrid Simulator Architecture (HSA) . . . . .	68
3.4.1	INSPIRE Hybrid Simulator Architecture - Modules	69
3.4.2	Heterogeneous Simulators as a part of the INSPIRE Co-Simulation . . . . .	71
3.5	Conclusion . . . . .	73

<b>4</b>	<b>Combined Modeling and Coupling Approach</b>	<b>75</b>
4.1	Introduction . . . . .	76
4.2	Integration Concept . . . . .	77
4.3	Substation Interworking Unit . . . . .	80
4.4	IEC 61850 based Modeling . . . . .	82
	4.4.1 Combined Data Model . . . . .	83
	4.4.2 Scenario Conversion . . . . .	85
	4.4.3 Data Exchange . . . . .	87
4.5	IEEE C37.118 Phasor Measurement Units . . . . .	90
4.6	Coupling of Simulators . . . . .	91
	4.6.1 Interface to the Power System Simulator . . . . .	91
	4.6.2 Communication Network Simulator . . . . .	92
4.7	Validating the Interplay of Simulators . . . . .	92
4.8	Conclusion . . . . .	96
<b>5</b>	<b>INSPIRE Time Management</b>	<b>97</b>
5.1	Introduction . . . . .	98
5.2	Related Work . . . . .	98
5.3	Fundamentals on HLA based Time Management Services . . . . .	102
	5.3.1 Lookahead (LA) . . . . .	103
	5.3.2 Time Advance Strategies . . . . .	104
5.4	Synchronizing the Power Systems Federate . . . . .	106
	5.4.1 Step Size . . . . .	106
	5.4.2 Synchronization Error . . . . .	108
5.5	Synchronizing the Communication Networks Federate . . . . .	109
	5.5.1 Maximum Time Advance Request (MTAR) . . . . .	110
5.6	INSPIRE Time Synchronization Algorithm . . . . .	111
5.7	Impact of Synchronization Error . . . . .	112
5.8	Conclusion . . . . .	114
<b>6</b>	<b>Co-Simulation Case Studies</b>	<b>117</b>
6.1	Reference Networks . . . . .	118
	6.1.1 Power System Reference Network . . . . .	118
	6.1.2 Communication Reference Network . . . . .	120
6.2	Case Study 1: Evaluating Delay on Local Process Layer . . . . .	121
	6.2.1 Network Calculus Technique . . . . .	121
	6.2.2 Scenario Description and Results . . . . .	122
6.3	Case Study 2: Delay in Wide Area Networks . . . . .	128
	6.3.1 Impact of Time Management on Communication Delay . . . . .	129

6.3.2	Performance Evaluation of the Communication Network . . . . .	131
6.4	Case Study 3: Impact on Smart Grid Monitoring . . . . .	132
6.4.1	Scenario 1 - Ideal Network Conditions . . . . .	134
6.4.2	Scenario 2 - Additional Background Traffic . . . . .	134
6.5	Case Study 4: Impact on Smart Grid Control . . . . .	135
6.5.1	Scenario 1 - No Intervention . . . . .	136
6.5.2	Scenario 2 - Ideal Network Conditions . . . . .	136
6.5.3	Scenario 3 - Additional Link Disconnect . . . . .	136
6.5.4	Scenario 4 - Additional Background Traffic . . . . .	138
6.5.5	Scenario 5 - Impact of Time Management . . . . .	138
6.6	Case Study 5: Wireless Extension . . . . .	139
6.6.1	Scenario 1 - Distributed Loads with wired Infrastructure . . . . .	141
6.6.2	Scenario 2 - Wireless Infrastructure 1 . . . . .	141
6.6.3	Scenario 3 - Wireless Infrastructure 2 . . . . .	142
6.7	Conclusion . . . . .	143
<b>7</b>	<b>Conclusion and Outlook</b>	<b>147</b>
7.1	Conclusion . . . . .	147
7.1.1	Co-simulation and its Applications . . . . .	148
7.1.2	Modeling Environment . . . . .	148
7.1.3	Time Management . . . . .	149
7.2	Outlook . . . . .	149
7.2.1	Hardware-in-the-Loop (HiL) Extension . . . . .	149
7.2.2	Adopting the Synchronization Error . . . . .	149
7.2.3	Future Network Design . . . . .	150
<b>A</b>	<b>Reference Systems</b>	<b>151</b>
A.1	New England Test System . . . . .	151
A.1.1	Symbols . . . . .	151
A.1.2	Line Data . . . . .	152
<b>B</b>	<b>Violin Plots</b>	<b>155</b>
<b>C</b>	<b>Scientific Activity Report</b>	<b>159</b>
C.1	Publications . . . . .	159
C.1.1	Journals/Transactions . . . . .	159
C.1.2	Conferences . . . . .	159

C.1.3	Articles . . . . .	161
C.1.4	Book Chapters . . . . .	161
C.1.5	Patents . . . . .	161
C.2	Technical Presentations . . . . .	161
C.3	Reviewer . . . . .	161
C.4	Supervisor of Student Projects and Theses . . . . .	162
C.5	Supervision of Project Groups and Seminars . . . . .	162
C.6	Teaching Duties . . . . .	162
C.7	Supervision of Research Projects . . . . .	163
<b>D</b>	<b>Bibliography</b>	<b>165</b>