University of Groningen

Multi-Energy Management of Buildings in Smart Grids

Fiorini, Laura

DOI:
[10.33612/diss.178373601](https://doi.org/10.33612/diss.178373601)

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:
2021

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):
Fiorini, L. (2021). *Multi-Energy Management of Buildings in Smart Grids*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. University of Groningen. <https://doi.org/10.33612/diss.178373601>

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Multi-Energy Management of Buildings in Smart Grids

Laura Fiorini

The research presented in this dissertation was performed in the Distributed Systems group of the Bernoulli Institute for Mathematics, Computer Science and Artificial Intelligence of the University of Groningen, The Netherlands, and in the Service Computing department of the Institute of Architecture of Application Systems of the University of Stuttgart, Germany.

The present research research was supported by the Netherlands Organization for Scientific Research (NWO) under the MERGE project, number 647.002.006, within the scope of the ESI-pose program and partially by the Topsector Energy (TSE) under the OurEnergy project, number TEUE117043, within the scope of the TKI Urban Energy program.

MERGE
S M A R T E N E R G Y

Published by: University of Groningen
Groningen, The Netherlands

Printed by: Eikon+
Krakow, Poland

Cover designed by: Lovebird design
www.lovebird-design.com

© 2021, Laura Fiorini

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, now known or hereafter invented, including photocopying or recording, without prior written permission of the author.

rijksuniversiteit
 groningen

Multi-Energy Management of Buildings in Smart Grids

Proefschrift

ter verkrijging van de graad van doctor aan de
Rijksuniversiteit Groningen
op gezag van de
rector magnificus prof. dr. C. Wijmenga
en volgens besluit van het College voor Promoties.

De openbare verdediging zal plaatsvinden op
vrijdag 17 september 2021 om 14.30 uur

door

Laura Fiorini

geboren op 9 juni 1990
te Pisa, Italië

Promotores

Prof. dr. M. Aiello
Prof. P. Pelacchi

Beoordelingscommissie

Prof. dr. Z. Lukszo
Prof. dr. C. De Persis
Prof. dr. N. Petkov

Summary

The ongoing energy transition from centralized, fossil fuel power plants towards distributed, low-carbon generation resources implies fundamental changes in the energy infrastructures and their management. The main challenge is to keep the energy supply secure and reliable, while phasing in increasing amount of renewable energy sources (RESs) and phasing out fossil fuels. On the one hand, renewable sources are low-carbon, inexhaustible, and freely available sources, contrary to high-carbon fossil fuels that are polluting, limited, and prone to trade and political disputes. On the other hand, RESs can be unpredictable as they strongly depend on weather conditions, and current technologies present low efficiency and low power density, thus requiring back-up or storage systems and large installation areas. The current energy systems are not yet ready for a change of paradigm in the energy supply and management, as they still strongly rely on the traditional top-down approach based on the centralized control of few, predictable resources. Major innovations from technical, social, and policy perspectives are needed for the realization of energy systems that can sustain the ongoing transformations and those still to come. Buildings and their users, once passive consumers, become an active part of the system: the penetration of small-scale distributed generation resources turn them into so-called prosumers; with more technologies available, their daily energy choices have a higher impact on the dynamic and sustainability of the system. The energy grids have, in turn, to shift from the traditional centralized, supply-follow-demand control toward a decentralized and dynamic operation of both the distribution and transmission system. A pervasive digitalization of the energy infrastructure and of the load is key to enable the interoperation among all stakeholders, a more accurate forecasting of both demand and renewable supply, and the real-time monitoring of the systems that such a transition requires.

In the vast, multidisciplinary domain of the energy sector and its transformation, this work tackles the challenge of rethinking the engineering and operation of energy systems to make them more efficient, more sustainable, and smarter. Tak-

ing an interdisciplinary approach between Power and Energy Engineering and Information and Communication Technologies (ICT), the research presented herein is part of the field of Energy Informatics and aims at contributing to the development of energy systems that promote energy efficiency and sustainability beyond what pure, traditional engineering solutions can do. In particular, we focus on the challenges of the energy management with increasing penetration of renewable sources at three levels of the energy system, namely, buildings, local energy communities, and transmission grids.

In the context of building decarbonization, we investigate the potential for smart homes to lower their carbon footprint while saving on their energy bills. We propose a model of the smart home as a multi-energy system, that considers both thermal and electric power needs. A home energy management system coordinates the supply and demand among multiple distributed energy resources based on dynamic energy prices and CO₂-emission intensities. Using historical data of three European countries, we evaluate the effectiveness of our approach in reducing both emissions and energy costs. The energy consumption mix appears to have a significant impact on the benefits that the coupling of energy services and the penetration of solar panels and storage may offer. For instance, plug-in electric vehicles combined with solar panels have a clear economic and environmental potential in Germany and, to a minor extent, in The Netherlands. In France, in contrast, the progressive introduction of solar panels and storage has little or even negative impact on the decarbonization of smart homes. The results show that there are ample opportunities for using both carbon and price signals in the landscape of smart home automation, in order to optimally use diverse energy carriers and coordinate the operation of multiple technologies, so as to remunerate the users, while reducing the carbon footprint of buildings.

As distributed generation proliferates, the second topic of interest deals with energy management and trading in energy communities, where multiple producers, consumers, and distributed energy resources coordinate their energy supply and demand to achieve a common goal. We design a multi-agent framework to simulate and analyze the dynamics of a peer-to-peer energy market in such a community. Using historical data of the Dutch energy market, the results show that local energy trading effectively reduces the energy exported to the main grid by up to 40%, hence counteracting the disruption cause by growing flow of power fed into the grid by small-scale producers. At the same time, energy costs decrease for both consumers and prosumers. The community as a whole becomes less dependent on the main grid and storage devices are effective in resolving unexpected imbalance between supply and demand.

We then look at the impact that the penetration of a large amount of renewables has on the operation of the high-voltage transmission network and the increasing need for flexibility. Batteries are among the most promising technologies to provide the required reliability and flexibility to shift towards more sustain-

able and smart energy grids. We propose a topological and probabilistic approach to find the optimal storage capacity and placement to increase the reliability and hosting capacity of renewables of networks with varying topology. The results show that large-scale batteries can be cost effective if their operation is oriented on reducing the curtailment of renewable energy and the energy not served to consumers. From a topological perspective, the presence of energy-hubs and small-world properties strongly increase the transmission effectiveness of weakly- and well-meshed grids, respectively.

The contribution of the present research to the field of Energy Informatics and smart energy systems is threefold. First, it lays the foundation for future smart home automation systems that can effectively contribute to building decarbonization. Second, it proposes a framework to mimic the dynamics of energy markets of the future, thereby giving more insights into the role of distributed resources in energy communities. Lastly, it provides the foundations for a new generation of planning tools for the transmission infrastructure that will rely both on robust and efficient networks allowing for high penetration of renewables.

Samenvatting

De energietransitie van gecentraliseerde fossiele energiecentrales naar gedistribueerde koolstofarme productiemiddelen vereist fundamentele veranderingen in de infrastructuur en het beheer van energie. De grootste uitdaging is om de energievoorziening veilig en betrouwbaar te houden terwijl, met toenemende mate, hernieuwbare energiebronnen worden geïntroduceerd en fossiele brandstoffen worden uitgefaseerd. Aan de ene kant zijn hernieuwbare bronnen koolstofarm, onuitputtelijk, en vrij verkrijgbaar; in tegenstelling tot fossiele brandstoffen, die vervuilend, beperkt, en vatbaar zijn voor handels- en politieke geschillen. Aan de andere kant kunnen hernieuwbare energiebronnen onvoorspelbaar zijn, gezien ze sterk afhankelijk van weersomstandigheden zijn, en geven ze met hedendaagse technologieën lage rendementen en vermogensdichtheden, waardoor back-up- of opslagsystemen en grote installatiegebieden nodig zijn. De huidige energiesystemen zijn nog niet klaar voor een transitie in de energievoorziening en het beheer aangezien ze nog sterk afhankelijk zijn van de traditionele top-down benadering die gebaseerd is op gecentraliseerde controle van slechts enkele voorspelbare middelen. Er zijn significante innovaties nodig vanuit technisch, sociaal en beleidsperspectief om energiesystemen te realiseren die de huidige en toekomstige transformaties kunnen bijhouden. Gebouwen en hun gebruikers (ooit passieve consumenten) worden een actief onderdeel van het systeem: de introductie van kleinschalige gedistribueerde energiebronnen maakt ze tot zogenaamde prosumenten, die via de aanwezige technologieën een grotere impact op de dynamiek en duurzaamheid van het systeem hebben met hun dagelijkse energiekeuzes. De energienetwerken moeten op hun beurt overgaan van de traditionele gecentraliseerde controle van aanbod-volgt-vraag op een gedecentraliseerde en dynamische exploitatie van het distributie- en transmissiesysteem. Een diepgaande digitalisering van de energie-infrastructuur en de netwerkbelasting is essentieel om samenwerking tussen alle belanghebbenden mogelijk te maken. Een dergelijke transitie vereist een nauwkeurigere voorspelling van zowel de vraag als het aanbod van hernieuwbare energie als het realtime monitoren van de systemen.

In het enorme multidisciplinaire domein van de energiesector en zijn transformatie, gaat dit werk de uitdaging aan om de techniek en werking van energiesystemen te heroverwegen om ze efficiënter, duurzamer en slimmer te maken. Met een interdisciplinaire benadering vanuit de energietechniek en informatica, maakt het hierin gepresenteerde onderzoek deel uit van het gebied van de energie-informatica en heeft als doel bij te dragen aan de ontwikkeling van energiesystemen die energie-efficiëntie en duurzaamheid bevorderen die verder gaan dan wat puur traditionele technische oplossingen kunnen doen. We richten ons in het bijzonder op de uitdagingen van het energiebeheer met de introductie van hernieuwbare bronnen in toenemende mate op drie niveaus van het energiesysteem, namelijk in gebouwen, lokale energiegemeenschappen en transmissienetwerken.

In het kader van het verlagen van de CO₂-emissie van gebouwen, onderzoeken we het potentieel van slimme huizen om hun CO₂-voetafdruk te verkleinen en te besparen op hun energierekening. We stellen een model voor van het slimme huis als een multi-energiesysteem dat rekening houdt met zowel thermische als elektrische energiebehoeftes. Een energiemanagementsysteem coördineert vraag en aanbod tussen meerdere gedistribueerde energiebronnen op basis van dynamische energieprijzen en de intensiteit van CO₂-emissies. We evalueren de effectiviteit van onze aanpak bij het verminderen van zowel emissies als energiekosten aan de hand van historische gegevens van drie Europese landen. De verhouding in energieverbruik lijkt een significante impact te hebben op de voordelen die de koppeling van energiediensten en de introductie van zonnepanelen en opslag kan bieden. Zo hebben plug-in elektrische voertuigen in combinatie met zonnepanelen een duidelijk economisch en ecologisch potentieel in Duitsland en, in mindere mate, in Nederland. In Frankrijk daarentegen heeft de geleidelijke introductie van zonnepanelen en opslag geen, of zelfs een negatief, effect op de verlaging van CO₂-emissies bij slimme huizen. De resultaten laten zien dat er volop mogelijkheden zijn om zowel CO₂- als prijssignalen in te zetten bij de automatisatie van slimme huizen, om daarmee optimaal gebruik te maken van diverse energiedragers, de werking van meerdere technologieën te coördineren, de gebruikers te belonen, en de CO₂-emissie van gebouwen te verlagen.

Met de toenemende gedistribueerde opwekking, kijkt het tweede onderwerp naar het energiebeheer en de handel binnen energiegemeenschappen, waarbij meerdere producenten, consumenten en gedistribueerde energiebronnen hun vraag en aanbod coördineren om een gemeenschappelijk doel te bereiken. We ontwerpen een multi-agent systeem om de dynamiek van een peer-to-peer energiemarkt in een dergelijke gemeenschap te simuleren en analyseren. Aan de hand van historische gegevens van de Nederlandse energiemarkt wijzen de resultaten uit dat lokale energiehandel de energie die naar het hoofdnets wordt geëxporteerd effectief tot 40% vermindert, en daarmee de ontvricting compenseert die wordt veroorzaakt door de groeiende stroomlevering aan het net door kleinschalige producenten. Tegelijkertijd dalen de energiekosten voor zowel consu-

menten als prosumenten. De gemeenschap wordt in zijn totaal minder afhankelijk van het hoofdnnet en opslagapparatuur is effectief in het oplossen van onverwachte onbalans tussen vraag en aanbod.

Vervolgens kijken we naar de impact die de introductie van grote hoeveelheden hernieuwbare energie heeft op de werking van het hoogspanningsnetwerk en de toenemende behoefte aan flexibiliteit. Batterijen behoren tot de meest kansrijke technologieën die de vereiste betrouwbaarheid en flexibiliteit bieden om over te schakelen naar duurzamere en slimme energienetwerken. We stellen een topologische en probabilistische benadering voor om de optimale opslagcapaciteit en plaatsing van batterijen te vinden die de betrouwbaarheid en capaciteit van hernieuwbare energiebronnen van netwerken met variërende topologie vergroten. De resultaten wijzen uit dat grootschalige batterijen kosteffectief kunnen zijn wanneer hun werking gericht is op het verminderen van de beperkingen van hernieuwbare energie en de energie die niet aan de consumenten wordt geleverd. Vanuit een topologisch perspectief verhogen de aanwezigheid van energie-hubs en small-world-eigenschappen de transmissie-effectiviteit, van respectievelijk zwak- en goed-verbonden netwerken, enorm.

De bijdrage van het gepresenteerde onderzoek op het gebied van energie-informatica en slimme energiesystemen is drievoudig. Ten eerste legt het de basis voor toekomstige automatisatie van slimme huizen dat effectief kan bijdragen aan de verlaging van CO₂-emissies van gebouwen. Ten tweede stelt het een manier voor om de dynamiek van de energiemarkten van de toekomst na te bootsen, waardoor meer inzicht wordt verkregen in de rol van gedistribueerde middelen in energiegemeenschappen. Ten slotte levert het de basis voor een nieuwe generatie planningstools ten behoeve van de transmissie-infrastructuur die zal vertrouwen op zowel robuuste als efficiënte netwerken om verregaande toepassing van hernieuwbare energiebronnen mogelijk te maken.

Contents

Summary	v
Samenvatting	ix
Content	xvi
1 Introduction	1
1.1 Transforming the Energy Sector	3
1.1.1 Toward smart buildings and multi-energy management . .	3
1.1.2 From prosumers to local energy communities	4
1.1.3 Flexible resources for reliable transmission grids	6
1.2 Future-Proof Smart Energy Systems	7
1.3 Thesis Scope and Organization	9
1.4 Publications	13
2 Sustainability Choices in Everyday Tasks	15
2.1 The Complexity of Everyday Tasks	15
2.2 The Energy Model of Cooking Pasta	16
2.2.1 Boiling water and cooking pasta	17
2.2.2 Equipment	18
2.2.3 Heating-cooking patterns	19
2.3 CO ₂ -Emission Intensity	20
2.4 User Choices Effects on CO ₂ Emissions	21
2.4.1 Annual variations	21
2.4.2 Daily variations	23
2.5 Concluding Remarks	24

3	Background	27
3.1	Multi-Energy Systems	27
3.1.1	Aggregation levels of multi-energy systems	28
3.2	Energy Management System for Operation Scheduling	31
3.2.1	Energy management system	31
3.2.2	Optimal operation scheduling	32
3.3	Demand Response Programs	33
3.3.1	Dynamic prices	34
3.3.2	CO ₂ -emission intensities	35
3.4	Power System as a Network	36
3.4.1	Linearized model of power systems	37
3.4.2	Fundamentals of network theory	39
3.4.3	Power grid as a graph	42
4	State of the Art	45
4.1	Modeling of Multi-Energy Systems	45
4.1.1	Diversity of distributed energy resources	46
4.1.2	Electrical and thermal loads	49
4.1.3	Distribution grids	51
4.1.4	Economic model	54
4.1.5	Uncertainties and information	56
4.1.6	Discrete vs continuous model	58
4.2	Optimization of Multi-Energy Systems	58
4.2.1	Optimization problems and objectives	58
4.2.2	Environmental considerations	63
4.2.3	Centralized vs decentralized control	63
4.2.4	Optimization techniques	66
4.3	Multi-Energy Management: Potential Achievements	71
4.3.1	Remarks	73
4.4	Energy Management in Energy Communities	75
4.5	Energy Storage Integration in HV-Grids	78
4.5.1	Sizing and siting of storage systems	79
4.5.2	Network topology and bulk power system reliability	80
5	Smart Energy Systems at the Grid's Edge	83
5.1	Components of Smart Energy Systems	83
5.1.1	Generation	84
5.1.2	Transformation and consumption	87
5.1.3	Storage	93
5.2	Smart Homes as Multi-Energy Systems	96
5.2.1	Smart home model	97
5.2.2	Multi-objective energy management	97

5.2.3	Multi-objective problem	97
5.2.4	Rolling horizon	101
5.2.5	Solution methodology	102
5.3	Smart Energy Communities	103
5.3.1	Local peer-to-peer (P2P) market	104
5.3.2	P2P energy management	105
5.3.3	Simulation framework	115
6	Multi-Energy Management of Homes across Borders	117
6.1	Households and Scenarios	117
6.1.1	Household data	118
6.1.2	Smart home configurations and scenarios	123
6.1.3	The German, French, and Dutch electricity sectors	126
6.1.4	Evaluation metrics	129
6.2	The German Case Study	131
6.3	The French Case Study	142
6.4	The Dutch Case Study	148
6.5	Discussion	159
6.5.1	Discussion of the case studies	160
6.5.2	Using the average-CO ₂	163
6.5.3	Consumption of a home energy management system (HEMS)	163
6.5.4	Design of a HEMS	164
7	Energy Trading and Management in Smart Local Energy Communities	167
7.1	Local Energy Trading in a Dutch Energy Community	167
7.1.1	Description of data and scenarios	168
7.1.2	Evaluation metrics	171
7.2	Results	171
7.3	Concluding Remarks	177
8	Integration and Management of Renewable Energy in High-Voltage Grid	181
8.1	Topological Representation of high-voltage (HV) Grids	182
8.1.1	Nodes	182
8.1.2	Edges	183
8.2	Probabilistic Approach and Operation Phases	183
8.2.1	Conventional generators availability and power demand	183
8.2.2	Wind and solar power generation	184
8.2.3	Modeling of the market environment	185
8.3	Sizing and Siting of Large-Scale Batteries	186
8.3.1	Sizing	187
8.3.2	Siting	187
8.4	Formulation of the Sizing and Siting Problem	190
8.4.1	Forecasting phase	191

8.4.2	Contingency procedure	192
8.4.3	Economic evaluation for sizing	193
8.4.4	DC load flow for siting	194
8.5	Topology of the Test Cases	196
8.6	Economic and Topological Evaluation	197
8.6.1	Cost-effective sizing of storage	199
8.6.2	Effects of different topologies	200
8.7	Concluding Remarks	205
9	Conclusions	207
9.1	The Future of Smart Multi-Energy Systems	207
9.1.1	Decarbonizing building energy use	208
9.1.2	Peer-to-Peer energy markets for local energy communities	209
9.1.3	Storage systems for reliable and flexible grids	211
9.2	Open Issues and Future Directions	212
	Bibliography	215
	Appendices	243
A	Loads and Technologies	243
A.1	Power profiles of household appliances	243
A.2	Annual electric energy consumption	243
A.3	Technologies and plug-in electric vehicles (PEVs)	245
	Acknowledgements	249
	About the Author	251