

**Multi-Agent Model Predictive Control
with Applications to Power Networks**

R.R. Negenborn

Multi-Agent Model Predictive Control with Applications to Power Networks

Proefschrift

ter verkrijging van de graad van doctor
aan de Technische Universiteit Delft,
op gezag van de Rector Magnificus prof.dr.ir. J.T. Fokkema,
voorzitter van het College van Promoties,
in het openbaar te verdedigen op dinsdag 18 december 2007 om 10:00 uur
door Rudy Rafaël NEGENBORN,
doctorandus in de informatica,
geboren te Utrecht.

Dit proefschrift is goedgekeurd door de promotoren:

Prof.dr.ir. J. Hellendoorn

Prof.dr.ir. B. De Schutter

Samenstelling promotiecommissie:

Rector Magnificus

Prof.dr.ir. J. Hellendoorn

Prof.dr.ir. B. De Schutter

Prof.dr. G.J. Olsder

Prof.dr. J.-J.Ch. Meyer

Prof.Dr. G. Andersson

Prof.Dr.-Ing. W. Marquardt

Ir. J.J.M. Langedijk

Prof.dr. C. Witteveen

voorzitter

Technische Universiteit Delft, promotor

Technische Universiteit Delft, promotor

Technische Universiteit Delft

Universiteit Utrecht

ETH Zürich

RWTH Aachen University

Siemens Nederland N.V.

Technische Universiteit Delft (reservelid)



This thesis has been completed in partial fulfillment of the requirements of the Dutch Institute of Systems and Control (DISC) for graduate studies. The research described in this thesis was supported by the project “Multi-agent control of large-scale hybrid systems” (DWV.6188) of the Dutch Technology Foundation STW and by an NWO Van Gogh grant (VGP79-99).

TRAIL Thesis Series T2007/14, The Netherlands TRAIL Research School

Published and distributed by: R.R. Negenborn

E-mail: rudy@negenborn.net

WWW: <http://www.negenborn.net/mampc/>

ISBN 978-90-5584-093-9

Keywords: multi-agent control, model predictive control, power networks, transportation networks.

Copyright © 2007 by R.R. Negenborn

All rights reserved. No part of the material protected by this copyright notice may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without written permission of the author.

Printed in The Netherlands

Contents

Preface	v
1 Introduction	1
1.1 Transportation networks	1
1.2 Control structures	3
1.2.1 Control structure design	6
1.2.2 Assumptions for design and analysis	7
1.3 Model predictive control	8
1.3.1 Single-agent MPC	8
1.3.2 Multi-agent MPC	11
1.4 Power networks	14
1.4.1 Physical power networks	14
1.4.2 Future power networks	15
1.4.3 Opportunities for multi-agent control	15
1.5 Overview of this thesis	16
1.5.1 Thesis outline	16
1.5.2 Road map	17
1.5.3 Contributions	18
2 Serial versus parallel schemes	19
2.1 Network and control setup	19
2.1.1 Network dynamics	19
2.1.2 Control structure	20
2.2 MPC of a single subnetwork	21
2.3 Interconnected control problems	22
2.3.1 Types of information exchange	24
2.3.2 Timing of information exchange	25
2.4 Lagrange-based multi-agent single-layer MPC	27
2.4.1 Combined overall control problem	28
2.4.2 Augmented Lagrange formulation	28
2.4.3 Distributing the solution approach	29
2.4.4 Serial versus parallel schemes	31
2.5 Application: Load-frequency control	33
2.5.1 Benchmark system	34
2.5.2 Control setup	36
2.5.3 Simulations	37
2.6 Summary	44

3	Networked hybrid systems	47
3.1	Transportation networks as hybrid systems	47
3.2	Modeling of hybrid systems	49
3.2.1	Models for MPC control	50
3.2.2	From discrete logic to linear mixed-integer constraints	50
3.2.3	Mixed-logical dynamic models	52
3.3	Application: Household energy optimization	52
3.3.1	Distributed energy resources	52
3.3.2	System description	53
3.3.3	MPC problem formulation	59
3.3.4	Simulations	61
3.4	Control of interconnected hybrid subnetworks	66
3.4.1	Hybrid subnetwork models	67
3.4.2	Non-convergence due to the discrete inputs	68
3.4.3	Possible extensions of the original schemes	68
3.4.4	Serial and parallel single-layer hybrid MPC approaches	70
3.5	Application: Discrete-input load-frequency control	71
3.5.1	Network setup	71
3.5.2	Control setup	71
3.5.3	Simulations	72
3.5.4	Results	72
3.6	Summary	75
4	Multi-layer control using MPC	77
4.1	Multi-layer control of transportation networks	77
4.1.1	Multi-layer control	78
4.1.2	Multi-layer control in power networks	78
4.1.3	MPC in multi-layer control	79
4.2	Constructing prediction models with object-oriented modeling	81
4.2.1	Object-oriented modeling	81
4.2.2	Modeling tools	82
4.2.3	Object-oriented prediction models	82
4.2.4	Linearized object-oriented prediction models	85
4.3	Supervisory MPC control problem formulation	88
4.3.1	Nonlinear MPC formulation	89
4.3.2	Direct-search methods for nonlinear optimization	90
4.3.3	Linear MPC formulation	92
4.4	Application: Voltage control in a 9-bus power network	93
4.4.1	The 9-bus dynamic benchmark network	94
4.4.2	Object-oriented model of the network	96
4.4.3	Control problem formulation for the higher control layer	100
4.4.4	Control using the nonlinear MPC formulation	103
4.4.5	Control using the linear MPC formulation	105
4.5	Summary	108

5	Overlapping subnetworks	109
5.1	Steady-state models of transportation networks	109
5.2	Subnetworks and their properties	111
5.2.1	Properties of subnetworks	111
5.2.2	Defining subnetworks	111
5.3	Influence-based subnetworks	113
5.3.1	Using sensitivities to determine subnetworks	113
5.3.2	Computing the sensitivities	114
5.3.3	Control of influence-based subnetworks	114
5.4	Multi-agent control of touching subnetworks	115
5.4.1	Internal and external nodes	115
5.4.2	Control problem formulation for one agent	116
5.4.3	Control scheme for multiple agents	118
5.5	Multi-agent control for overlapping subnetworks	120
5.5.1	Common nodes	120
5.5.2	Control problem formulation for one agent	122
5.5.3	Control scheme for multiple agents	124
5.6	Application: Optimal flow control in power networks	124
5.6.1	Steady-state characteristics of power networks	125
5.6.2	Control objectives	128
5.6.3	Setting up the control problems	128
5.6.4	Illustration of determination of subnetworks	129
5.6.5	Simulations	129
5.7	Summary	133
6	Conclusions and future research	137
6.1	Conclusions	137
6.2	Future research	139
	Bibliography	143
	Glossary	155
	TRAIL Thesis Series publications	159
	Samenvatting	165
	Summary	169
	Curriculum vitae	173

Samenvatting

Multi-Agent Modelgebaseerd Voorspellend Regelen met Toepassingen in Elektriciteitsnetwerken

Transportnetwerken, zoals elektriciteitsnetwerken, verkeersnetwerken, spoornetwerken, waternetwerken, etc., vormen de hoekstenen van onze moderne samenleving. Een soepele, efficiënte, betrouwbare en veilige werking van deze netwerken is van enorm belang voor de economische groei, het milieu en de leefbaarheid, niet alleen wanneer deze netwerken op de grenzen van hun kunnen moeten opereren, maar ook onder normale omstandigheden. Aangezien transportnetwerken dichter en dichter bij hun capaciteitslimieten moeten werken, en aangezien de dynamica van dergelijke netwerken alsmaar complexer wordt, wordt het steeds moeilijker voor de huidige regelstrategieën om adequate prestaties te leveren onder alle omstandigheden. De regeling van transportnetwerken moet daarom naar een hoger niveau gebracht worden door gebruik te maken van nieuwe geavanceerde regelstrategieën.

Elektriciteitsnetwerken vormen een specifieke klasse van transportnetwerken waarvoor nieuwe regelstrategieën in het bijzonder nodig zijn. De structuur van elektriciteitsnetwerken is aan het veranderen op verschillende niveaus. Op Europees niveau worden de elektriciteitsnetwerken van individuele landen meer en meer geïntegreerd door de aanleg van transportlijnen tussen landen. Op nationaal niveau stroomt elektriciteit niet langer alleen van het transmissienetwerk via het distributienetwerk in de richting van bedrijven en steden, maar ook in de omgekeerde richting. Daarnaast wordt op lokaal niveau regelbare belasting geïnstalleerd en kan energie lokaal gegenereerd en opgeslagen worden. Om minimumeisen en -serviceniveaus te kunnen blijven garanderen, moeten *state-of-the-art* regeltechnieken ontwikkeld en geïmplementeerd worden.

In dit proefschrift stellen wij verschillende regelstrategieën voor die erop gericht zijn om de opkomende problemen in transportnetwerken in het algemeen en elektriciteitsnetwerken in het bijzonder het hoofd te bieden. Om het grootschalige en gedistribueerde karakter van de regelproblemen te beheersen gebruiken wij *multi-agent* aanpakken, waarin verschillende regelagenten elk hun eigen deel van het netwerk regelen en samenwerken om de best mogelijke netwerkbrede prestaties te behalen. Om alle beschikbare informatie mee te kunnen nemen en om vroegtijdig te kunnen anticiperen op ongewenst gedrag maken wij gebruik van modelgebaseerd voorspellend regelen (MVR). In de regelstrategieën die wij in dit proefschrift voorstellen, combineren wij multi-agent aanpakken met MVR. Hieronder volgt een overzicht van de regelstrategieën die wij voorstellen en de regelproblemen uit de specifieke klasse van elektriciteitsnetwerken, waarop wij de voorgestelde regelstrategieën toepassen.

Multi-agent modelgebaseerd voorspellend regelen

In een multi-agent regeling is de regeling van een systeem gedistribueerd over verschillende regelagenten. De regelagenten kunnen gegroepeerd worden aan de hand van de autoriteitsrelaties die tussen de regelagenten gelden. Een dergelijke groepering resulteert in een gelaagde regelstructuur waarin regelagenten in hogere lagen meer autoriteit hebben over regelagenten in lagere lagen en waarin regelagenten in dezelfde laag dezelfde autoriteitsrelaties met betrekking tot elkaar hebben. Gebaseerd op de ideeën van MVR bepalen in multi-agent MVR de regelagenten welke actie zij nemen aan de hand van voorspellingen. Deze voorspellingen maken zij met behulp van voorspellingsmodellen van die delen van het algehele systeem die zij regelen. Daar waar de regelagenten in hogere lagen typisch minder gedetailleerde modellen en langzamere tijdschalen beschouwen, beschouwen regelagenten op lagere regellagen typisch meer gedetailleerde modellen en snellere tijdschalen. In dit proefschrift worden de volgende regelstrategieën voorgesteld en bediscussieerd:

- Voor de coördinatie van regelagenten in een regellaag wordt een nieuw serieel schema voor multi-agent MVR voorgesteld en vergeleken met een bestaand parallel schema. In de voorgestelde aanpak wordt aangenomen dat de dynamica van de deelnetwerken alleen uit continue dynamica bestaat en dat de dynamica van het algehele netwerk gemodelleerd kan worden met verbonden lineaire tijdsinvariante modellen, waarin alle variabelen continue waarden aannemen.
- In de praktijk komt het regelmatig voor dat deelnetwerken hybride dynamica vertonen, veroorzaakt door zowel continue als discrete dynamica. We bediscussiëren hoe discrete dynamica gevat kan worden in modellen bestaande uit lineaire vergelijkingen en ongelijkheden en hoe regelagenten dergelijke modellen kunnen gebruiken bij het bepalen van hun acties. Daarnaast stellen wij een uitbreiding voor van de coördinatie-schema's voor continue systemen naar systemen met continue en discrete variabelen.
- Voor een individuele regelagent die richtpunten bepaalt voor regelagenten in een lagere regellaag wordt het opzetten van object-georiënteerde voorspellingsmodellen bediscussieerd. Een dergelijk object-georiënteerd voorspellingsmodel wordt dan gebruikt om een MVR-regelprobleem te formuleren. Wij stellen voor om de optimalisatietechniek *pattern search* te gebruiken om het resulterende MVR-regelprobleem op te lossen. Daarnaast stellen wij omwille van de efficiëntie een MVR-regelstrategie voor die gebaseerd is op een gelineariseerde benadering van het object-georiënteerde voorspellingsmodel.
- Regelmatig worden deelnetwerken gedefinieerd op basis van reeds bestaande netwerkregio's. Dergelijke deelnetwerken overlappen meestal niet. Als deelnetwerken echter gebaseerd worden op bijvoorbeeld invloedsgebieden van actuatoren, dan kunnen de deelnetwerken overlappend zijn. Wij stellen een regelstrategie voor voor het regelen van overlappende deelnetwerken door regelagenten in een hogere regellaag.

Multi-agent regelproblemen in elektriciteitsnetwerken

Elektriciteitsnetwerken vormen een specifieke klasse van transportnetwerken waarvoor de ontwikkeling van geavanceerde regeltechnieken noodzakelijk is om adequate prestaties te

behalen. De regelstrategieën die in dit proefschrift worden voorgesteld worden daarom aan de hand van toepassing op specifieke regelproblemen uit elektriciteitsnetwerken geëvalueerd. In het bijzonder worden de volgende regelproblemen besproken:

- We beschouwen een gedistribueerd *load-frequency* probleem, wat het probleem is van het dicht bij nul houden van frequentie-afwijkingen na verstoringen. Regelagenten regelen elk hun eigen deel van het netwerk en moeten samenwerken om de best mogelijke netwerkbrede prestaties te behalen. Om deze samenwerking te bewerkstelligen gebruiken de regelagenten de seriële of de parallele MVR-strategieën. We beschouwen zowel samenwerking gebaseerd op voorspellingsmodellen die alleen continue variabelen bevatten, als met gebruikmaking van voorspellingsmodellen die zowel continue als ook discrete variabelen bevatten. Met behulp van simulaties illustreren we de prestaties die de schema's kunnen behalen.
- In de nabije toekomst zullen huishoudens de mogelijkheid hebben om hun eigen energie lokaal te produceren, lokaal op te slaan, te verkopen aan een energie-aanbieder en mogelijk uit te wisselen met naburige huishoudens. We stellen een MVR-strategie voor die gebruikt kan worden door een regelagent die het energiegebruik in een huishouden regelt. Deze regelagent neemt in zijn regeling verwachte energieprijzen, voorspelde energieconsumptiepatronen en de dynamica van het huishouden mee. We illustreren de prestaties die de regelagent kan behalen voor een gegeven scenario van energieprijzen en consumptiepatronen.
- Spanningsinstabiliteiten vormen een belangrijke bron van elektriciteitsuitval. Om te voorkomen dat spanningsinstabiliteiten ontstaan is lokaal bij generatielokaties een laag van regelagenten geïnstalleerd. Een dergelijke lokale regeling werkt onder normale omstandigheden goed, maar levert ten tijde van grote verstoringen geen adequate prestaties. In dergelijke situaties moeten de acties van de lokale regelagenten gecoördineerd worden. Wij stellen een MVR-regelagent voor die tot taak heeft deze coördinatie te realiseren. De voorgestelde MVR-strategie maakt gebruik van ofwel een object-georiënteerd model van het elektriciteitsnetwerk ofwel van een benadering van dit model verkregen na linearisatie. We illustreren de prestaties die behaald kunnen worden met behulp van simulaties op een dynamisch 9-bus elektriciteitsnetwerk.
- Regeling gebaseerd op *optimal power flow* (OPF) kan gebruikt worden om in transmissienetwerken de *steady-state* spanningsprofielen te verbeteren, het overschrijden van capaciteitslimieten te voorkomen, en vermogensverliezen te minimaliseren. Een type apparaat waarvoor met behulp van OPF-regeling actuatorinstellingen bepaald kunnen worden zijn *flexible alternating current transmission systems* (FACTS). Wij beschouwen een situatie waarin verschillende FACTS-apparaten aanwezig zijn en elk FACTS-apparaat geregeld wordt door een regelagent. Elke regelagent beschouwt als zijn deelnetwerk dat deel van het netwerk dat zijn FACTS-apparaat kan beïnvloeden. Aangezien de deelnetwerken gebaseerd zijn op beïnvloedingsregio's kunnen verschillende deelnetwerken overlappend zijn. Wij stellen een coördinatie- en communicatieschema voor dat kan omgaan met een dergelijke overlap. Via simulatiestudies op een aangepast elektriciteitsnetwerk met 57 bussen illustreren we de prestaties.

