



Doctoral Thesis

Modelling and Optimisation-Based Control for Enhanced Performance of Electric Power Converters

Author(s):

Fischer, Claudia M.

Publication Date:

2015

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010532873> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 22798

**Modelling and Optimisation-Based Control for
Enhanced Performance of Electric Power Converters**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

CLAUDIA MARIA FISCHER

MSc ETH, ETH Zurich, Switzerland

born on 13.01.1986
citizen of Austria

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Manfred Morari (examiner)
Dr. Sébastien Mariéthoz (co-examiner)
Dr. Silvia Mastellone (co-examiner)

2015

Abstract

Switched mode electric power converters are important components in today's electricity dependent world. They interface power sources, grids, and consumers that operate at different AC and DC voltage levels. Their performance is a topic of growing interest, as high performance converters enable efficient, grid-friendly energy conversion and compact converter design. This dissertation aims at enhancing the performance of switched mode electric power converters through control. To achieve this, optimisation-based control approaches are sought that are applicable to a wide class of converters.

First, a modelling framework is established that forms the basis for these control approaches. The framework features a discrete time model of the system dynamics, that accurately captures the switched system behaviour without constraining the modulation to predefined switching patterns. It furthermore includes relevant system outputs such as the power transfer and important performance measures such as reference tracking and conversion losses. As all models are compatible with the mixed-logical-dynamical (MLD) framework [7], the modelling framework allows for formulating mixed integer optimisation problems to find the converter operation for optimal system performance that are suitable for commercially available optimisation software. Next, the framework is employed in two optimisation-based control methods: Model predictive control and optimisation-based control of cyclic systems.

In the second part of this thesis, the modelling framework is used in four different model predictive control (MPC) schemes. They differ in model accuracy, i.e. discretisation rate of the dynamics, and control update rate. The first presented scheme is averaging MPC, where the controller is updated once per switching period. This scheme is based on the commonly used averaged model of the system dynamics, which is obtained straightforwardly in the modelling framework by choosing the discretisation equal to the switching frequency. The resulting optimisation problems are generally linear or quadratic programs. The second scheme, intersampling MPC as presented e.g. in [5] or [31], uses more accurate, hybrid models with a higher discretisation frequency and the same control update rate as averaging. Using the presented modelling framework, this more accurate model of the system dynamics allows for including performance measures such as conversion losses in the MPC problem, resulting in linear or quadratic mixed integer programs. The third scheme, the herein proposed multisampling MPC, combines the model accuracy and corresponding benefits of intersampling MPC with a higher control update rate, which allows for faster reaction to disturbances. The formulation of averaging, intersampling, and multisampling MPC using the modelling framework is illustrated for a buck converter in simulation. Finally, the fourth MPC scheme, originally published

in [54], is here presented as averaging MPC with multisampled filtering. The accurate model of the system dynamics with a high discretisation rate is employed to estimate the rippling states and their averages. This allows to make better use of available measurement, as every sample contributes to the state estimate, and prevents the ripple from entering the control feedback loop. The optimisation problem is formulated based on the average, ripple-free dynamics, resulting in optimisation problems of similar complexity to the averaging approach. The effectiveness of the scheme is demonstrated in simulation for a single phase grid inverter, that is operated at a low switching frequency and where the control goals are a high power factor and rejection of low-order harmonics.

In some applications, dynamic control using MPC approaches based on hybrid models yields optimisation problems that are computationally prohibitive. For such cases, the use of the framework to find optimal cyclic steady state operation is proposed. The optimisation problems are solved offline and the resulting optimal modulation patterns are stored in a look-up table. As an example application of the approach, the class of multisource converters is presented. The control goal is to minimise conversion losses. The effectiveness of the approach is first investigated in simulation for a twosource converter where the impact of the resistance on the dynamics is negligible. The proposed scheme is compared to two state-of-the-art approaches: the commonly used rectangular modulation and the close to optimal modulation for reduced switching losses in [65]. An extension of the proposed approach for the given application is presented. It allows for finding the loss-optimal switching frequency at each operating point. Its impact is assessed in simulation. Finally, the effectiveness and real-time applicability of the proposed look-up table based approach is demonstrated experimentally on a twosource lab setup. In this setup, the impact of the resistance on the system dynamics is not negligible. While the optimisation-based approaches found in literature do not consider this scenario, the proposed approach is directly applicable. To assess both, dynamic performance and efficiency of the controller, an experimental protocol is presented that only uses the measurements necessary for control, allows for in-lab testing of twosource power converters, and scales to high power applications.

In summary, this thesis presents an MLD-compatible modelling framework that captures important properties of a class of switched mode electric power converters, its use in different optimisation-based control approaches, and the resulting performance improvements in selected applications.

Zusammenfassung

Im Zeitalter zunehmender Elektrifizierung und steigenden Strombedarfs spielen Stromrichter eine wichtige Rolle. Sie bilden die Schnittstelle zwischen Stromproduzenten, Übertragungsnetzwerken und Verbrauchern, welche unterschiedliche Gleich- oder Wechselspannungen aufweisen. Den Betriebseigenschaften von Stromrichtern wurde in den vergangenen Jahren mehr und mehr Aufmerksamkeit geschenkt, da bessere Stromrichter netzfreundlichere Stromwandlung, reduzierte Verluste und kompaktere Schaltungsbauweisen ermöglichen. Ziel dieser Dissertation ist es, die Betriebseigenschaften von Stromrichtern durch Regelung zu verbessern. Dies soll durch optimierungsbasierte regelungstechnische Ansätze erreicht werden, welche nicht auf bestimmte Stromrichtertopologien beschränkt sind, sondern breite Anwendung für eine grosse Gruppe von Stromrichtern finden.

Die Grundlage einer solchen optimierungsbasierten Regelung bildet die mathematische Modellierung. Ausgangspunkt hierfür ist ein zeitdiskretes Modell der Systemdynamik, welches deren geschaltetes Verhalten widerspiegelt ohne die Modulation auf vordefinierte Muster zu beschränken. Darauf aufbauend werden verschiedene Systemausgänge, wie beispielsweise die übertragene Leistung, und relevante Leistungskennwerte, wie Führungsverhalten oder Energiewandlungsverluste, modelliert. All diese Modelle sind mit der 'Mixed-Logical-Dynamical'-Formulierung (MLD) [7] kompatibel. Es ist also möglich, basierend auf diesen Modellen Optimierungsprobleme zur Findung des optimalen Systembetriebs zu formulieren, welche für kommerzielle Optimierungssoftware geeignet sind. Solche Optimierungsprobleme werden anschliessend in zwei optimierungsbasierten Regelungsansätzen verwendet: Modellprädiktive Regelung (MPC) und optimierungsbasierte Regelung zyklischer Systeme.

Im zweiten Teil dieser Dissertationsschrift wird die mathematische Modellierung und Optimierung in vier verschiedenen MPC-Ansätzen verwendet. Die Ansätze unterscheiden sich in der Modellgenauigkeit, d.h. in der Diskretisierungsfrequenz der Dynamik, und in der Reglerfrequenz. Der erste Ansatz ist gemittelttes MPC. Dabei ist die Regler- und Abtastfrequenz gleich der Schaltfrequenz des Systems. Gemittelttes MPC beruht auf dem gebräuchlichen gemittelten Modell der Systemdynamik. Im präsentierten Modellierungsansatz entspricht dies einer Diskretisierungsfrequenz gleich der Schaltfrequenz. Die daraus resultierenden Optimierungsprobleme sind im Allgemeinen lineare oder quadratische Programme. Der zweite Ansatz ist zwischenabgetastetes MPC wie in [5] oder [31]. Dabei wird ein genaueres, hybrides Modell der Systemdynamik verwendet, das aus einer höheren Diskretisierungs- und Abtastfrequenz im Vergleich zur Schaltfrequenz resultiert, wobei die Reglerfrequenz gleich der Schaltfrequenz bleibt. Die Signale werden während des Reglerzyklus 'zwischenabgetastet'. Mit diesem genaueren Modell der Systemdynamik können Leistungskriterien

wie Wandlungsverluste vom Regler berücksichtigt werden. Die resultierenden Optimierungsprobleme sind gemischt-ganzzahlige lineare oder quadratische Programme. Der dritte MPC Ansatz ist das hier neu eingeführte mehrfachabgetastete MPC, das die Vorteile der hohen Modellgenauigkeit von zwischenabgetastetem MPC mit einer höheren Reglerfrequenz verknüpft. Dies ermöglicht dem Regler, schneller auf Störungen zu reagieren. Die konkrete Anwendung der mathematischen Modellierung für gemittelt, zwischen- und mehrfachabgetastetes MPC wird anschliessend in Simulation für einen Tiefsetzsteller illustriert. Der vierte MPC Ansatz wurde ursprünglich in [54] publiziert. Er wird hier als gemittelt MPC mit mehrfachabgetastetem Filtern eingeführt. Hierbei wird das genaue, hybride Modell der Systemdynamik dazu verwendet, die Welligkeit der Zustände und deren Mittelwert zu schätzen. Damit trägt jeder Messwert der welligen Signale zur Schätzung der gemittelten Signale bei, die Welligkeit gerät nicht in die Rückführung für die Regelung, und die verfügbaren Informationen werden besser genutzt. Das Optimierungsproblem für MPC wird basierend auf den gemittelten Signalen formuliert und hat damit eine mit dem gemittelten MPC vergleichbare Komplexität. Die Effektivität dieses Ansatzes wird für einen einphasigen Wechselrichter mit niedriger Schaltfrequenz in einer Simulation demonstriert. Die Regelziele sind ein hoher Leistungsfaktor und Unterdrückung von niederfrequenten Oberschwingungen.

In manchen Anwendungen führt der dynamische Regelungsansatz mit MPC basierend auf den hybriden Modellen zu Optimierungsproblemen mit übermässigem Lösungsaufwand. In diesen Fällen kann stattdessen die optimale zyklische Gleichgewichtsbetriebsart eines Stromrichters berechnet werden. Die Optimierungsprobleme werden dann vorab gelöst und die resultierenden Schaltmuster in einer Nachschlagetabelle gespeichert. Als Anwendungsbeispiel für diesen Ansatz wird die Familie der Mehrquellenwandler präsentiert. Das Ziel der Regelung ist die Minimierung der Wandlungsverluste. Die Effektivität des Ansatzes wird zuerst in Simulation für einen Zweiquellenwandler mit vernachlässigbarem Einfluss des elektrischen Widerstandes auf die Systemdynamik untersucht. Zum Vergleich werden zwei andere Regelungsansätze aus der Literatur herangezogen: Die gebräuchliche Rechteckmodulation und die nahezu optimale Regelung zur Reduktion der Schaltverluste in [65]. Anschliessend wird eine Erweiterung der Modellierung und des Optimierungsproblems für diese Anwendung präsentiert. Damit kann in jedem Arbeitspunkt die verlustoptimale Schaltfrequenz gefunden werden. Die Auswirkungen dieser Erweiterung werden in weiteren Simulationen untersucht. Zu guter Letzt wird die Effektivität und Echtzeitanwendbarkeit des vorgeschlagenen Regelungsansatzes experimentell für einen Zweiquellenwandler demonstriert. Im experimentellen Aufbau ist der Einfluss des elektrischen Widerstandes auf die Systemdynamik nicht vernachlässigbar, ein Fall, der in der einschlägigen Literatur nicht berücksichtigt ist, vom vorgeschlagenen Ansatz aber problemlos abgedeckt wird. Das präsentierte Versuchsprotokoll ermöglicht, gleichzeitig das dynamische Verhalten und die Verluste nur aufgrund der für die Regelung notwendigen Messwerte zu bestimmen und auch Stromrichter mit sehr grossen Leistungen im Laborversuch zu testen.

Zusammenfassend werden in dieser Dissertationsschrift eine MLD Modellierung

der Dynamik und wichtiger Eigenschaften von geschalteten Stromrichtern, die Verwendung dieser Modellierung in optimierungsbasierten Regelungsansätzen und die dadurch erreichbaren Verbesserungen der Leistungswandlung in bestimmten Anwendungen präsentiert.