

DISS. ETH NO. 23554

# **Control of Residential and Commercial Loads for Power System Ancillary Services**

A thesis submitted to attain the degree of  
**Doctor of Sciences of ETH Zurich**  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

**Evangelos Vrettos**

Dipl.-Ing. National Technical University of Athens  
born on 29 March 1987  
citizen of  
Greece

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Göran Andersson, examiner  
Prof. Dr. John Lygeros, co-examiner  
Prof. Dr. Steven H. Low, co-examiner

2016

# Abstract

Due to environmental concerns related to burning fossil fuels and nuclear waste disposal, the energy mix has been changing during the last decades with the integration of Renewable Energy Sources (RES). However, RES inject fluctuating electric power into the grid because they depend on the availability of primary natural resources such as wind and solar power. These fluctuating power injections create frequency and voltage deviations from their nominal values, which have to be mitigated to maintain a secure and reliable power supply. Traditionally, the power system operators control the frequency and voltage using active and reactive power reserves offered by conventional generators. Therefore, a large integration of RES will challenge the traditional power system operation because the need for reserves increases and at the same time the portion of controllable generation resources decreases.

Although the traditional operation paradigm in power systems is to dispatch controllable generators to follow a variable electricity demand, it is also conceptually possible to control some portion of the demand to follow a variable generation power infeed. This idea was already proposed in the 1980's, and since then industrial loads participate in programs to support power system operation in many countries. However, there is a lot of potential for reserve provision from residential and commercial loads that remains widely untapped due to challenges related to control complexity, implementation costs, and regulatory aspects.

The main goal of this thesis is to develop methods to enable provision of power system reserves from residential and commercial loads, and verify their suitability for practical implementation in simulation and experimental studies. In addition, this thesis investigates using load control to reduce the electricity cost of individual customers in a way that is

beneficial for the power system. We consider thermal loads, such as refrigerators and Electric Water Heaters (EWHs) in residential buildings, as well as the Heating, Ventilation and Air-Conditioning (HVAC) systems of commercial buildings, because temporary interruptions in their operation are not noticed by the users due to thermal inertia.

The first part of this thesis presents predictive and rule-based controllers to minimize the electricity cost of buildings by shifting the energy consumption to the low-price intervals or consuming the energy produced by rooftop Photovoltaics (PV) within the building premises. The second part of this thesis develops several methods to provide power system Ancillary Services (AS), namely Primary Frequency Control (PFC), Secondary Frequency Control (SFC) and voltage regulation.

More specifically, we propose a decentralized stochastic control method to allow a large aggregation of refrigerators to provide PFC without real-time communication. In addition, we present centralized control algorithms to allow an aggregation of EWHs to track a SFC signal with different levels of information feedback. These algorithms are then extended to account for the constraints of Distribution Networks (DNs) and provide frequency reserves while regulating the DN voltage at the same time. Furthermore, we develop a state estimation method to enable SFC without the need for real-time communication between the central controller and the loads.

A main outcome of this thesis is the development of a hierarchical controller to allow aggregations of commercial buildings to provide SFC reserves reliably and accurately, while trying to maximize energy efficiency. The controller's performance is demonstrated in simulations with models of Swiss office buildings, and its technical feasibility is verified in frequency regulation experiments at a commercial building test facility at the Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL).

The results of this thesis show that with proper control design the flexibility of residential and commercial thermal loads can be used to provide reserves to the power system. Moreover, dynamic frequency studies with a two-area power system model show that a large integration of heterogeneous thermal loads in frequency control will help to reduce frequency deviations and enhance frequency stability.

# Kurzfassung

Aufgrund von zunehmenden ökologischen Bedenken bezüglich der Nutzung von fossilen Brennstoffen und der Entsorgung von nuklearen Abfällen wird elektrische Energie in den letzten Jahrzehnten vermehrt aus erneuerbaren Energiequellen (Renewable Energy Sources, RES) gewonnen. Da RES von natürlichen Ressourcen wie Wind und Sonneneinstrahlung abhängen, fluktuiert die elektrische Einspeisung ins Netz. Diese Fluktuationen verursachen wiederum Spannungs- und Frequenzabweichungen, welche entsprechend kontrolliert werden müssen um eine sichere und zuverlässige Energieversorgung zu garantieren. Frequenz und Spannung werden traditionellerweise durch Wirk- und Blindleistungsreserven, bereitgestellt durch konventionelle Kraftwerke, kontrolliert. Eine grossflächige Integration von RES ist deshalb eine Herausforderung für die herkömmliche Betriebsweise, da zum einen die Reserveanforderungen steigen und andererseits der Anteil an herkömmlichen regelbaren Generatoren sinkt.

Obwohl in diesem traditionellen Betriebsparadigma von Energiesystemen die Generatoren dem variablen Bedarf der Lastseite folgen, ist es konzeptionell auch möglich einen bestimmten Teil der Last so zu kontrollieren, dass sie einer variablen Energieeinspeisung folgt. Diese Idee wurde in den 1980er Jahren bereits vorgeschlagen, und seitdem unterstützen in vielen Ländern industrielle Lasten den Betrieb des Energiesystems. Trotzdem gibt es Potenzial für die Bereitstellung von Reserven aus häuslichen und kommerziellen Lasten, welche diesbezüglich bis heute weitgehend unerschlossen bleiben. Die Hauptgründe sind die Komplexität der Regelung eines solchen Systems, die Kosten einer Implementation und regulatorische Aspekte.

Das Hauptziel dieser Doktorarbeit ist die Entwicklung von Methoden,

welche die Kleinverbraucher und kommerzielle Lasten für Regelreserven nutzbar machen, sowie die Beurteilung der Umsetzbarkeit in Simulationen und Experimenten. Zudem untersucht diese Arbeit, wie mittels Laststeuerung die Elektrizitätskosten von einzelnen Kunden reduziert werden können und gleichzeitig Vorteile für den Systembetrieb bringen. Es werden thermische Lasten, wie Kühlschränke und elektrische Boiler (Electric Water Heaters, EWHs) in Wohnhäusern, als auch die Heiz-, Lüftungs- und Klimaanlage in kommerziellen Gebäuden berücksichtigt, da kurzzeitige Betriebsunterbrüche aufgrund der thermischen Trägheit von Benutzern kaum bemerkt werden.

Im ersten Teil werden prädiktive und regelbasierte Regelungen zur Minimierung der Elektrizitätskosten von Gebäuden präsentiert. Diese verschieben den Energieverbrauch in Zeiträume mit niedrigeren Preisen oder konsumieren die Energie von Photovoltaik-Anlagen, welche in der Nähe der Gebäude vorhanden sind. Im zweiten Teil werden verschiedene Methoden entwickelt um Systemdienstleistungen anzubieten, vor allem Primärregelreserven (Primary Frequency Control, PFC), Sekundärregelreserven (Secondary Frequency Control, SFC) und Spannungshaltung.

Insbesondere wird eine dezentralisierte, stochastische Regelmethode vorgeschlagen. Diese ermöglicht die Aggregation von vielen Kühlschränken um PFC zu erbringen, ohne dass dabei Kommunikation in Echtzeit nötig ist. Zusätzlich werden zentralisierte Regelalgorithmen präsentiert, welche es erlauben einem SFC Signal mit einer Aggregation von EWH zu folgen. Dabei werden verschiedene Signale benutzt. Die Algorithmen werden anschliessend so erweitert, dass sie in Verteilnetzen eingesetzt werden können und neben der Frequenz auch die Spannung regulieren können. Des Weiteren entwickeln wir eine Methode zur Zustandsschätzung, welche es erlaubt SFC anzubieten, ohne dass eine Echtzeitkommunikation zwischen einem zentralen Regler und den Lasten besteht.

Ein Hauptresultat der Dissertation ist der entwickelte hierarchische Regler, der eine SFC-Bereitstellung aus einer Aggregation von kommerziellen Gebäuden ermöglicht. Dieser Regler garantiert eine zuverlässige und genaue Bereitstellung und maximiert gleichzeitig die Energieeffizienz. Die Leistungsfähigkeit wird mittels Simulationen von Schweizer Bürogebäuden durchgeführt und die technische Machbarkeit wurde in Experimenten zur Frequenzregelung in einer Testumgebung für kommerzielle Gebäude des Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)

untersucht.

Die Resultate dieser Dissertation zeigen auf, dass Wohnhäuser als auch kommerzielle Gebäude Reserven mit einem geeigneten Reglerdesign bereitstellen können. Zudem zeigen dynamische Frequenzstudien in einem Energiesystem mit zwei Regionen, dass eine grossflächige Integration von heterogenen thermischen Lasten im Prozess der Frequenzregelung zu einer Reduktion von Frequenzabweichungen führt und die Frequenzstabilität erhöht.