



Doctoral Thesis

Dynamics of the polymer electrolyte fuel cell experiments and model-based analysis

Author(s):

Rodatz, Paul Hendrik

Publication Date:

2003

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004701371> →

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 Nr. 15320

**DYNAMICS OF THE POLYMER
ELECTROLYTE FUEL CELL:
EXPERIMENTS AND MODEL-BASED ANALYSIS**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
PAUL HENDRIK RODATZ
Dipl. Masch.-Ing. ETH
born 18.9.1973
Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. L. Guzzella, examiner
Prof. Dr. A. Wokaun, co-examiner
Prof. Dr. A. Stefanopoulou, co-examiner

2003

ABSTRACT

Fuel cells are considered to be a viable alternative to the internal combustion engine, since they have a higher efficiency, especially in part load conditions. In combination with hydrogen as fuel they enable a power conversion free from CO₂ emissions. Although extensive effort is undertaken to accelerate the commercialization of the fuel cell, most research is performed on single cells with a small active area and a power output of a few watts. Moreover, these cells are often operated at optimal conditions with regard to humidification, temperature and reactant flows.

In this thesis the transient behavior of a large PEM fuel cell stack is investigated. For this purpose a fuel cell test bench equipped with a fuel cell stack was built. The stack delivers 6 kW electric power. Experience obtained through the work on the fuel cell powered experimental Hy.Power vehicle was incorporated into this test bench. The test bench was designed and constructed to be as similar to the vehicle as possible, in order to obtain operating conditions that are typical for automotive applications. Many parts used in the test bench are also found in the vehicle.

From the data about the current-voltage relationship at different operating conditions a one-dimensional model was developed. This model considers the transport of the reactants (oxygen and hydrogen) and that of water orthogonal to the membrane surface. Beside other internal variables the model facilitates the computation of the membrane water content and the partial pressure of the reactants at the electrode-membrane interface. With these internal variables the magnitude of the Ohmic losses as well as of the activation polarization and eventually the cell voltage are determined. Even though the three-dimensional stack is reduced to a one-dimensional problem, the current-voltage relationship obtained from simulation agrees well with the experimental data. The computational burden is substantially smaller when compared to more extensive models.

This steady-state fuel cell model forms the foundation for the investigation of the transient behavior of the fuel cell stack. The measured voltage response to current steps, current spikes and air stoichiometry steps are compared to the voltage variation predicted by the steady-state simulation. The deviation between simulation and measurement allows to draw conclusions on the origin of the transient phenomena. The hydration/dehydration process of the fuel cell is found to be several orders of magnitude slower than the adaptation of the kinetics to new boundary conditions. The response of the fuel cell voltage to load changes is shown to follow a characteristic sequence. Furthermore, a slight, reversible decrease of the stack voltage with time is observed even when the operating parameters are not manipulated. The source of this decrease is analyzed and a procedure to lessen this decrease is proposed and tested.

Conventional PI controllers do not consider the crosscoupling of variables in interconnected systems. Therefore, the control of the air supply system using PI controllers was marked by large overshoots. The performance was thus unsatisfactory, especially since the air supply has a major impact on the voltage response. In this thesis a dynamic model of the air supply system was developed. Thereby a good agreement between simulation and measurement data was obtained. This model was used to design a model-based controller for the air supply system. The performance of this controller is compared to that of a set of PI controllers and showed a significantly improved performance with regard to response time and decoupling of mass flow and pressure.

ZUSAMMENFASSUNG

Brennstoffzellen sind eine vielversprechende Alternative zu Verbrennungsmotoren, da sie, insbesondere im Teilleistbereich, einen höher Wirkungsgrad aufweisen. In Kombination mit Wasserstoff ermöglichen sie eine Leistungsumwandlung ohne CO₂ Emissionen. Trotz erheblicher Anstrengung um die Kommerzialisierung der Brennstoffzelle zu beschleunigen, wird hauptsächlich noch an Einzelzellen mit einer kleinen aktiven Fläche und wenig Leistung geforscht. Zudem werden diese Zellen oft bei optimalen Bedingungen in bezug auf Befeuchtung, Temperatur und Massenfluss der Reaktanden betrieben.

In dieser Arbeit wird das transiente Verhalten eines grossen PEM (Polymer Electrolyte Membrane) Brennstoffzellen-Stapels untersucht. Hierzu wurde ein Prüfstand aufgebaut, der mit einem Brennstoffzellen-Stapel mit einer elektrische Leistung von 6kW ausgerüstet ist. Die Erfahrungen, welche bei der Arbeit mit dem brennstoffzellenbetriebenen Hy.Power Fahrzeug gewonnen wurden, konnten erfolgreich beim Bau dieses Prüfstandes eingesetzt werden. Der Prüfstand wurde so ausgelegt, dass die Betriebsbedingungen typisch für automobiler Anwendungen sind. Viele Bauteile am Prüfstand wurden auch im Fahrzeug verwendet.

Anhand der gemessenen Strom-Spannungs-Daten bei verschiedenen Betriebsbedingungen wurde ein ein-dimensionales Modell entwickelt. Das Modell berücksichtigt den Transport der Reaktanden (Sauerstoff und Wasserstoff) und des Wasser senkrecht zur Membranoberfläche. Neben anderen internen Variablen erlaubt das Modell die Berechnung des Membran-Wassergehalts und der Partialdrücke der Reaktanden an der Grenzfläche zwischen Membran und Elektrode. Mit diesen Variablen wird der Ohm'sche Spannungsverlust, die Aktivierungs-Polarisation und schlussendlich die Zellspannung berechnet. Obwohl das drei-dimensionale Problem zu einem ein-dimensionalen Problem reduziert wurde, stimmen die berechneten Strom-Spannungs-Daten gut mit den Messdaten überein. Der Rechenaufwand ist verglichen mit detaillierteren Modellen jedoch wesentlich geringer.

Dieses stationäre Brennstoffzellen-Modell bildet die Grundlage für die Untersuchungen des transienten Verhaltens des Stapels. Die gemessenen Spannungsantworten auf Stromsprüngen, Stromspitzen und Änderungen der Luftstöchiometrie werden mit den berechneten Spannungsverläufen verglichen. Anhand der Unterschiede zwischen Simulation und Messung kann eine Aussage über die Herkunft der transienten Phänomene getroffen werden. Der Hydratations/Dehydratations Prozess der Brennstoffzelle ist mehrere Grössenordnungen langsamer als die Anpassung der Kinetik an die neuen Randbedingungen. Die Antwort der Brennstoffzellen auf Laständerung folgt einem charakteristischen Schema. Weiter wurde eine leichte reversible Abnahme der Stapelspannung mit der Zeit beobachtet, welche auch bei unveränderten Betriebsbedingungen auftritt. Die Ursache für diese Abnahme wird untersucht. Ein Verfahren zur Minderung der Abnahme wird vorgeschlagen und getestet.

Herkömmliche PI-Regler berücksichtigen nicht die Koppelung der Zustandsvariablen. Daher war die Regelung des Luftzufuhr-Systems mit PI-Reglern durch grosse Überschwinger gekennzeichnet. Dieses Verhalten ist nicht zufriedenstellend, da die Luftzufuhr einen grossen Einfluss auf den Spannungsverlauf hat. Deshalb wurde in dieser Arbeit ein dynamisches Modell des Luftzufuhr-Systems entwickelt. Das Modell wurde anschliessend für den Entwurf eines modellbasierten Reglers verwendet. Das Verhalten dieses Reglers weisst verglichen mit den PI-Reglern eine wesentliche höhere Qualität in bezug auf Antwortzeit und Entkoppelung von Druck und Massenstrom auf.