



Doctoral Thesis

Energy management strategies for hybrid electric vehicles

Author(s):

Ambühl, Daniel

Publication Date:

2009

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005902053> →

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. 18435

ENERGY MANAGEMENT STRATEGIES FOR HYBRID ELECTRIC VEHICLES

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Science

presented by
Daniel Ambühl

Dipl. Ing. ETH in Mechanical Engineering
born October 5, 1979
citizen of Davos, Graubünden

accepted on the recommendation of
Prof. Lino Guzzella, examiner
Prof. Sergio M. Savaresi, co-examiner

2009

Abstract

Hybrid electric vehicles are commonly known as a promising solution to reduce the fuel consumption with existing technology for the near future. Due to the presence of at least two power converters in the powertrain, there is a new degree of freedom compared to conventional vehicles. An appropriate control of this degree of freedom is required to achieve lowest possible fuel consumption.

The objective of this thesis is to develop novel control algorithms for the before mentioned degree of freedom in order to minimize fuel consumption. These algorithms are evaluated in simulations, but finally, they have to be applicable to real vehicles. Therefore, the algorithms must be causal, which means that they can only exploit information available in the present and the past. Further, they have to be computationally very efficient, since the computational power and the memory capacity in the engine control unit are limited.

This objective is approached by first evaluating the global optimum with dynamic programming as a benchmark for any real-time capable control strategies. Such globally optimal solutions are acausal and can only be evaluated in simulation. In this thesis, a new method is presented that allows to enhance the accuracy and the computational efficiency of dynamic programming for single-state optimal control problems with final state constraints.

Causal control strategies are derived and investigated in a second step. A simplified model for the hybrid powertrain is introduced in addition to the original model. This simplified model allows to derive explicit solutions for the optimal control, resulting in a strategy that is computationally very attractive and allows to gain insight into its structure. An investigation of these causal control strategies with the original and the simplified model has shown, that they achieve very good performance in terms of fuel consumption as long as there are no severe recuperation phases. For driving cycles with elevation profiles, the fuel consumption achieved by

these strategies differ significantly from the theoretical optimum.

In order to extend these strategies such that they show good performance even in environments with elevation profiles, some knowledge on the future driving conditions is taken into account. A novel algorithm has been developed in this thesis that evaluates a reference trajectory for the future state-of-charge of the battery such that low fuel consumption can be achieved in conjunction with the previously proposed strategy even in driving conditions with elevation changes. This algorithm exploits data from the navigation system on the trip that is planned such as the topographic profile and the average traveling speeds on each road segment. This predictive algorithm is computationally very efficient and the resulting fuel consumption is improved considerably compared to the non-predictive strategy.

In a last step, the optimal starting and stopping decision for the engine has been investigated. For the case of a full electric hybrid, it is optimal to shut the engine off for some time intervals and to drive electrically. However, if there is no cost in terms of fuel consumption assigned to an engine start, the solutions resulting from optimal control can show frequent starting and stopping of the engine. In order to approach this problem systematically, modeling of the energetic cost assigned to each engine start is required. An investigation of the optimal solution of the energy management problem including starting cost has shown, that this energetic starting cost cannot be neglected for an appropriate control. A model predictive control scheme is introduced for the decision on the engine operation. The performance in terms of fuel consumption of this model predictive control is evaluated as a function of the prediction horizon. These results revealed that a very short prediction horizon is sufficient to achieve close to optimum performance.

Zusammenfassung

Elektrische Hybridfahrzeuge stellen eine vielversprechende Lösung dar, um den Treibstoffverbrauch mit bestehender Technologie für die nahe Zukunft zu reduzieren. Die Verfügbarkeit von mindestens zwei Leistungsquellen im Antriebsstrang ergibt einen zusätzlichen Freiheitsgrad im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen. Eine geeignete Steuerung dieses Freiheitsgrades ist notwendig um einen tiefst möglichen Treibstoffverbrauch zu erzielen.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung neuer Regelalgorithmen für den erwähnten Freiheitsgrad, so dass der Treibstoffverbrauch minimiert wird. Diese Algorithmen werden zwar in Simulationen untersucht, letztlich müssen sie jedoch im echten Fahrzeug eingesetzt werden können. Folglich müssen diese Algorithmen kausal sein. Dies bedeutet, dass sie nur Informationen aus der Gegenwart und der Vergangenheit ausnützen dürfen. Des Weiteren müssen sie recheneffizient sein, da die Rechenleistung und die Speicherkapazität im Motorsteuergerät begrenzt sind.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird zuerst das globale Optimum mittels Dynamischer Programmierung als Referenz für echtzeitfähige Regelstrategien ausgewertet. Solche global optimalen Lösungen sind akausal und können nur in Simulationen gefunden werden. In dieser Arbeit wird eine neue Methode gezeigt, welche es erlaubt, die Präzision und die rechnerische Effizienz der Dynamischen Programmierung für skalare, optimale Regelungsprobleme mit beschränktem Endzustand signifikant zu verbessern.

Kausale Regelstrategien werden in einem zweiten Schritt hergeleitet und untersucht. Zusätzlich zum ursprünglichen Modell des hybriden Antriebsstranges wird ein vereinfachtes Modell eingeführt. Dieses vereinfachte Modell erlaubt die Herleitung expliziter Lösungen für die optimale Regelung, was zu einer Strategie führt, welche rechnerisch attraktiv ist und eine klare Struktur aufweist. Die Untersuchung dieser kausalen Strategien, welche auf dem ursprünglichen und dem vereinfachten Modell basieren, hat aufgezeigt, dass diese sehr gute Resultate bezüglich Treibstoffver-

brauchs erzielen, solange keine drastischen Rekuperationsphasen vorliegen. Für Fahrmuster mit Höhenprofil hingegen, weicht der Treibstoffverbrauch, welcher mit solchen Strategien erzielt wird, deutlich vom theoretischen Optimum ab.

Die bisher entwickelten Strategien wurden so erweitert, dass sie Informationen über das zukünftige Fahrmuster berücksichtigen, damit auch in hügeligen Umgebungen gute Treibstoffverbräuche erzielt werden. In dieser Arbeit wurde ein neuer Algorithmus entwickelt, welcher eine Referenztrajektorie für den zukünftigen Ladestand der Batterie vorgibt, so dass, in Kombination mit der bestehenden kausalen Strategie, tiefst mögliche Treibstoffverbräuche auch in Fahrmustern mit Höhenprofil erzielt werden können. Dieser Algorithmus nutzt Daten über die geplante Fahrstrecke aus dem Navigationssystem. Diese Daten bestehen aus dem Höhenprofil und den durchschnittlichen Reisegeschwindigkeiten der jeweiligen Streckenabschnitte. Dieser prädiktive Algorithmus ist rechnerisch sehr effizient und der erzielte Treibstoffverbrauch ist gegenüber der nicht-prädiktiven Strategie deutlich verbessert.

Als letzter Schritt wurde die optimale Start/Stop-Entscheidung für den Verbrennungsmotor untersucht. Im Falle eines Vollhybridfahrzeuges ist es in gewissen Zeiträumen optimal den Verbrennungsmotor abzuschalten und rein elektrisch zu fahren. Wenn allerdings für einen Start des Verbrennungsmotors keine Kosten betreffend Treibstoffverbrauch berücksichtigt sind, resultiert in Lösungen aus der optimalen Regelung häufiges Starten und Stoppen des Motors. Um dieses Problem systematisch anzugehen, müssen diese energetischen Startkosten modelliert werden. Die Untersuchung der optimalen Lösung des Energiemanagementproblems mit Startkosten hat gezeigt, dass diese Kosten in der Regelstrategie nicht vernachlässigt werden sollten. Eine modellbasierte prädiktive Regelung für den Betrieb des Verbrennungsmotors wurde eingeführt und der erzielte Treibstoffverbrauch dieser modellbasierten prädiktiven Regelung wurde als Funktion des Prädiktionshorizontes untersucht. Die Resultate haben gezeigt, dass ein sehr kurzer Prädiktionshorizont ausreicht, um Treibstoffverbräuche zu erzielen, welche nahe beim theoretischen Optimum liegen.