

ABSTRAK

PEMODELAN TERINTEGRASI BATERAI-KENDARAAN DAN KENDALI PID OPTIMAL KUADRATIK LINIER BERBASIS UMPAN BALIK STATUS PARSIAL UNTUK PENGHEMATAN ENERGI PADA KENDARAAN LISTRIK

Oleh

Rina Ristiana

NIM: 33214010

(Program Studi Doktor Teknik Elektro dan Informatika)

Saat ini kendaraan listrik belum secara luas digunakan sebagai alat transportasi massal karena kendaraan listrik memiliki keterbatasan energi yang tersimpan dalam baterai. Salah satu solusi untuk mengatasi keterbatasan energi baterai adalah dengan cara optimasi energi yang menghasilkan suatu pengendalian optimal dari sisi pemakaian energi. Pengendali optimal dirancang untuk meminimumkan indeks kinerja dengan memperhatikan variabel kendala. Indeks kinerja menggambarkan kriteria yang ingin dicapai oleh sistem, sedangkan variabel kendala menjelaskan karakteristik kendala fisik dan model sistem. Oleh karena itu pemilihan model sistem dan metoda kendali optimal menjadi bagian yang penting dalam merancang kendali optimal. Penelitian ini mengusulkan strategi optimasi energi dengan pendekatan kendali optimal melalui penentuan pemodelan sistem dan metoda perancangan kendali optimal yang tepat untuk penghematan energi pada kendaraan listrik.

Model kendaraan listrik yang ada saat ini dinamakan model motor-kendaraan yang meliputi dinamika motor dan kendaraan longitudinal. Dalam disertasi ini, model motor-kendaraan tersebut disederhanakan dengan mengabaikan gaya tahan angin dan dinamakan model biasa. Sebagai pengembangan model lebih lanjut, dalam disertasi ini dibangun juga model kendaraan yang memperhitungkan dinamika baterai ke dalam model motor-kendaraan dan gaya tahan angin. Model ini dinamakan model terintegrasi baterai-kendaraan atau cukup disebut model terintegrasi saja. Model terintegrasi juga dibangun dengan mempertimbangkan variasi variabel pengendalian seperti torka atau kecepatan, pemindah tenaga dan penggunaan jenis baterai. Perancangan pengendali menggunakan model motor-kendaraan saat ini mengasumsikan sumber energi baterai adalah tetap setiap saat. Pada kenyataannya energi baterai berubah. Oleh sebab itu diperlukan model yang memperhitungkan interaksi atau pengaruh antara baterai dengan sistem motor-kendaraan listriknya, dengan demikian dibangunlah model terintegrasi baterai-kendaraan.

Validasi model sistem dilakukan melalui validasi sistem lingkaran terbuka dan tertutup. Validasi sistem lingkaran terbuka meliputi analisis model untuk setiap subsistem dan sistem secara keseluruhan. Pertama, parameter nyata kendaraan

listrik digunakan pada model kendaraan listrik. Kemudian, simulasi dilakukan untuk pengamatan tanggapan sistem lingkaran terbuka pada setiap subsistem dan sistem lengkap. Hasil simulasi tersebut, kemudian dibandingkan dengan tanggapan sistem nyata kendaraan listrik yang diperoleh dari data hasil uji-jalan Molina ITB Model-3. Validasi sistem lingkaran tertutup meliputi perbandingan beberapa kasus rancangan pengendali yang menggunakan model tersebut dengan cara simulasi komputer serta simulasi pada sistem minimum kendaraan listrik (*EV testbed platform*) berbasis *hardware in the loop simulator* (HILS).

Untuk melihat potensi penghematan energi, model biasa dan terintegrasi digunakan untuk perancangan pengendali. Pengendali yang digunakan dalam penelitian ini adalah pengendali linier yang sudah ada. Model biasa merupakan model linier, sedangkan model terintegrasi merupakan model tak linier. Khusus untuk model tak linier dilakukan linierisasi atau disebut linierisasi model terintegrasi. Model biasa dan linierisasi model terintegrasi tersebut digunakan pada perancangan pengendali yang sama untuk memperoleh suatu tanggapan waktu yang dianggap sama. Semua kasus perancangan pengendali tersebut diterapkan pada model terintegrasi tak linier atau model lengkap sistem kendaraan listrik. Jika tanggapan waktu dibuat sama atau mirip, kondisi lingkungan sama, pola kecepatan sama, dan formulasi perhitungan energi sama maka akan diperoleh konsumsi energi berbeda untuk setiap kasus pengendali. Hal tersebut digunakan sebagai dasar pertimbangan dalam analisis konsumsi energi pada penelitian ini. Hasil simulasi, validasi dan pengujian menunjukkan bahwa penggunaan model terintegrasi memiliki potensi lebih hemat energi dibandingkan penggunaan model biasa.

Metoda perancangan kendali optimal yang diusulkan pada penelitian ini adalah metoda perancangan kendali PID optimal kuadrat linier berbasis umpan balik status parsial beserta kombinasinya. Kendali PID adalah pengendali konvensional yang banyak dipergunakan dengan strukturnya yang sederhana. Masalah utama kendali PID terletak pada penalaan setiap konstanta kendalinya (K_p , K_i , K_d). Untuk sistem berorde tinggi, metode perancangan penalaan pengendali PID dilakukan dengan cara mereduksi orde sistem atau mereduksi orde pengendali, sedangkan dalam penelitian ini metoda yang diusulkan adalah metoda perancangan penalaan pengendali PID atau kendali PID optimal tanpa mereduksi orde sistem dan memilih variabel yang akan diumpan-balikkan ke sistem tanpa memerlukan pengamat.

Kendali PID optimal ini memiliki indeks kinerja kuadrat linier. Penentuan indeks kinerja tersebut dilakukan berdasarkan beberapa alternatif formulasi energi yang ada pada kendaraan listrik seperti energi mekanik, energi listrik, energi kendali dan energi baterai. Penggabungan beberapa alternatif formulasi energi tersebut memberikan formulasi indeks kinerja kuadrat linier yang mengandung perkalian antara variabel status dan variabel kendali. Formulasi indeks kinerja tersebut memberikan potensi penghematan energi jika digunakan sebagai dasar metoda perancangan kendali optimal. Untuk sistem yang dinyatakan dalam bentuk kanonik, penalaan PID optimal dapat dilakukan dengan cara mengadopsi metoda kuadrat linier berbasis umpan balik status parsial tersebut dengan penyelesaian pertidaksamaan matriks linier, yang dikembangkan menjadi kendali PID optimal kuadrat linier berbasis umpan balik status parsial beserta kombinasinya. Sebagai

bahan perbandingan analisis konsumsi energi, juga dirancang berbagai kendali optimal kuadrat linier berbasis umpan balik status penuh dengan pengamat. Pengamat ini dirancang berdasarkan model terintegrasi yang memiliki variabel status tidak teramati.

Semua perancangan pengendali linier baik berbagai kendali berbasis umpan balik status penuh dengan pengamat maupun kendali PID optimal berbasis umpan balik status parsial beserta kombinasinya diaplikasikan pada model terintegrasi. Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian menunjukkan bahwa kendali penjejakan PID optimal kuadrat linier berbasis umpan balik status parsial merupakan pengendali yang lebih hemat energi dibandingkan pengendali lainnya.

Model terintegrasi baterai-kendaraan dan metoda kendali PID optimal kuadrat linier berbasis umpan balik status parsial merupakan kontribusi dari penelitian ini. Model terintegrasi dan metoda kendali PID optimal tersebut dapat diterapkan pada kendaraan listrik sejenis mobil secara umum yang dilengkapi sistem pengemudi otomatis seperti *autodrive system* atau *assisted drive system*, di antaranya adalah *cruise control system*.

Kata kunci: kendaraan listrik, model terintegrasi baterai-kendaraan, kendali optimal kuadrat linier, kendali PID optimal, kendali umpan balik status parsial, pertidaksamaan matriks linier.

ABSTRACT

INTEGRATED BATTERY-ELECTRIC VEHICLE MODELING AND PID OPTIMAL CONTROL BASED ON LINEAR QUADRATIC PARTIAL STATE FEEDBACK FOR ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC VEHICLE

By

Rina Ristiana

NIM: 33214010

(Doctoral Program in Electrical and Informatics Engineering)

Currently, electric vehicles (EVs) are not widely used as a means of mass transportation because EVs have limited energy stored in batteries. One solution to overcome the limitations of battery energy storage is energy optimization based on an optimal control of energy consumption. An optimal control is designed to minimize the performance index by taking into account the constraint variables. The performance index describes the goal to be achieved by the system, while the variable constraints explain the characteristics of the physical constraints and the system model. Therefore, selecting the optimal control system model and method is an important part of designing an optimal control. This research proposes an energy optimization strategy with an optimal control approach through the determination of the system modeling and the method of designing an optimal control for energy efficiency in electric vehicles.

The most current model of electric vehicles is called the motor-vehicle model, which includes motor dynamics and longitudinal vehicles. In this dissertation study, the motor-vehicle model is simplified by ignoring the wind resistance. This model is called the ordinary model. As a further development of the model, a vehicle model that takes into account the dynamics of the battery and wind resistance is built into the motor-vehicle model. This model is called the integrated battery-electric vehicle model or simply the integrated model. The integrated model was also built by considering variations in control variables such as torque or speed, gear train, and battery type used. Currently, the design of controllers using motor-vehicle models assumes that the source of battery energy is fixed at all times. In fact, the battery energy changes. Therefore, we need a model that takes into account the interaction between the battery and the motor-electric vehicle system, thus building an integrated battery-electric vehicle model.

System model validation is done through open-loop and closed-loop system validation. Open-loop system validation includes an analysis of the model for each subsystem and the overall system. First, real parameters from electric vehicles were applied in the electric vehicle model. Then, a simulation is carried out to observe the open system responses in each subsystem and the complete system. The simulation results were then compared with real system responses of electric

vehicles obtained from Molina ITB Model-3 test-drive results. The closed-loop system validation involved comparing several cases of controller designs using the model by means of computer simulations as well as simulations on a hardware-based minimum vehicle (EV testbed platform) system based on hardware in a loop simulator (HILS).

To see the energy saving potential, regular and integrated models were used for the controller design. The controller used in this study was an existing linear controller. The ordinary model was a linear model, whereas the integrated model was a non-linear model. Specifically, for the nonlinear model linearization was carried out, called linearization of the integrated model. The regular model and the linearized integrated model were used in the same controller design to obtain a response time that could be considered the same. All cases of the controller design were applied to nonlinear integrated models or complete models of the electric vehicle system. When the response time is kept the same or similar and the environmental conditions, the speed pattern, and the formulation of the energy calculation are kept the same, different energy consumption values will be obtained for each controller case. This principle was used as the basis for consideration in the analysis of the energy consumption in this study. The simulation, validation and test results showed that the use of an integrated model has the potential to be more energy-efficiency than the use of an ordinary model.

The optimal control design proposed in this study is a linear-quadratic optimal PID control design based on partial status feedback and its combination. PID control is a conventional controller with a simple structure that is widely used. The main problem of PID control lies in tuning each of its control constants (K_p , K_i , K_d). For high-order systems, the PID controller tuning design method is used by reducing the system order or reducing the control order, whereas in this study the method proposed is the PID controller tuning design method or optimal PID control without reducing the system order and selecting the variables to be feedback into the system without the need for an observer.

This optimal PID control has a linear quadratic performance index. The determination of the performance index is based on several alternative energy formulations available in electric vehicles, such as mechanical energy, electrical energy, control energy, and battery energy. The combination of several alternative energy formulations provides a linear quadratic performance index formulation that contains multiplication between the status variable and the control variable. The performance index formulation provides potential energy savings if used as a basis for the optimal control design method. For systems expressed in canonical form, optimal PID tuning can be done by adopting a linear quadratic method based on partial status feedback by solving linear inequality matrices, which are developed into linear-quadratic optimal PID controls based on partial status feedback and their combinations. For comparison in the energy consumption analysis, various linear-quadratic optimal controls based on full status feedback were also designed.

All linear controller designs, both full-status feedback-based controls with observer and optimal PID controls based on partial status feedback and their combinations, were applied to the integrated model. The simulation and testing results showed that the linear-quadratic optimal PID tracking control based on partial status feedback was more energy-efficient than the other controllers.

The contributions of this study are the integrated battery-electric vehicle model and the optimal PID control based on linear quadratic partial status feedback method. In general, the integrated model and the optimal PID control method can be applied to electric vehicles, such as cars, that are equipped with automatic driver systems such as an auto-drive system or an assisted drive system including cruise control.

Keywords: electric vehicle, integrated battery-vehicle model, optimal quadratic linear control, optimal PID control, partial status feedback control, linear matrix inequality.