

博士論文要旨

論文題名： リチウムイオン蓄電池の高精度等価回路モデルおよびそれを用いた最適電池制御システムに関する研究

立命館大学大学院理工学研究科
電子システム専攻博士課程後期課程

リン ライ

LIN Lei

近年、再生可能エネルギーの普及に伴い、エネルギーの貯蔵技術が重要な課題となっている。その中でも、リチウムイオン蓄電池は電気エネルギーを高密度に貯蔵できるデバイスとして注目されている。蓄電池管理において、残量予測、劣化診断、電池の熱管理は重要な3つの課題である。

リチウムイオン蓄電池は比較的劣化が少ない蓄電池とされるが、高価であるため、劣化を抑えた使用が望まれる。蓄電池劣化には様々な要因があるが、温度上昇による劣化は蓄電池劣化の主要因である。そのため、蓄電池の温度上昇を抑える技術が重要である。そのため、蓄電池の熱回路モデルを用いた蓄電池の熱挙動を解析する。熱回路モデルは規模が大きいので、並列計算による高速化が求められる。そのために、GPGPUを用いた回路の効率的な並列計算について述べ、熱回路モデルへの展開手法を明らかにした。高精度な後退オイラー法を解くための疎行列の効率的なデータ構造を提案し、従来の疎行列表現方法に対して約63%の計算量で実現することを示した。また、クロック周波数3GHzのCPU(E8400)に比較してコア周波数1.54GHz並列数512のGPU(GTX580)で、最大74倍の計算の高速化を実現した。これは、GPU-CPU間通信ロスなどを除外し、すべてのプログラムがコア数の数だけ並列度があるとした場合の理論的な高速化上界に比べ、約50%の性能である。通信ロスが約30%であること、データ転送や条件分岐等の並列化できない部分が含まれることを考えると革新的な結果である。

蓄電池は内部抵抗の劣化に伴い、起電力や内部抵抗などの内部パラメータが変化する。そのため、蓄電池の内部パラメータをリアルタイムに把握するのは重要な課題である。本研究では蓄電池のOCVと電極表面抵抗の同定手法を解明した。SOCとOCVの関係に着目し、端子電圧と端子電流の比率に基づいて最適な忘却係数を算出する手法を解明した。従来の固定忘却係数手法に比べ、SOCの最大誤差を半分以下に抑えることができ、有効性を示した。また、温度や電

流条件の変動に対しても良好な推定結果を示すことを実験により確認した。

リチウムイオン蓄電池の状態管理において、残量予測は最も重要かつ基本的な技術である。蓄電池残量は、蓄電池充電率 (SOC: State of Charge) といい、負極側にリチウムイオンが集中する度合いを数値化する重要な指標である。本研究では、拡張カルマンフィルタを用いた高精度残量予測手法を提案し、実装と評価を行った。また、カルマンフィルタが用いる観測方程式とノイズ分散を自動的に推定する手法を明らかにした。従来技術では、最適なノイズ分散を計算するためには総当たりの膨大な計算機実験 (約 1000 回程度のカルマンフィルタ処理) が必要であったが、それを自動算出することにより計算量を大幅に削減した。また、評価の結果、従来の総当たり手法以上の SOC 推定精度の向上が得られた。これは処理途中でノイズを可変的に最適化する効果にもよるものであり、革新性の高いものである。

Abstract of Doctoral Thesis

Title: Research for highly accurate equivalent circuit model of lithium-ion storage battery and its application to optimal battery management system

Doctoral Program in Electronic and Computer Systems
Graduate School of Science and Engineering
Ritsumeikan University

リン ライ
LIN Lei

With the advent of the large-scale popularization of lithium-ion secondary batteries, it is imperative for measurement system to be accurate and cost-effective. In the battery management system, the state of charge (SOC) estimation and state of health (SOH) estimation and the thermal management of the storage battery is the most basic technology.

Temperature rise is one of the causes of the storage battery degradation. Therefore, the technology to suppress the temperature rise of the storage battery is important. Then, a thermal model of the storage battery is required. In this paper, we analyze the thermal behavior of a storage battery using a thermal circuit. Since the size of the thermal circuit model is large, unless parallel calculation is performed, there is enormous time. In order to solve the problem, we propose a method to speed up the analysis of thermal circuit model by diverting parallel calculation of electric circuit using GPGPU. We proposes a fast and accurate parallel transient simulator for power grid by Backward Euler method using GPU. A new data structure CSG (Compressed Sparse for Grid structure) is proposed for the computational efficiency, it can be realized with about 63% computational cost compared to conventional sparse matrix representation method. It is about 50% performance compared with the speed upper bound. As the result, we have implemented a simulator whose speed is 74.0 times faster than CPU calculation. It is an innovative result considering that the communication loss is about 30%, and that the part which cannot be parallelized such as data transfer and conditional branching.

To estimate the state of health, the internal parameters identification method of the storage battery is the most basic technology. In this paper, we propose the on-line internal parameters identification method of lithium-ion battery using the Recursive Least-Squares method (RLS) and evaluate the identification method using test experiments. Since batteries fluctuate during discharge terminal voltage, is not appropriate to dispose a constant forgetting factor, in order to solve the problem, we proposed the setting method of the forgetting factor using the ratio terminal of terminal voltage and discharge rate (average current).

The state of health estimation is a very important technology for battery measurement system. Self-discharge, voltage drop by internal resistance, and polarization make it very difficult to directly estimate the SOC from the external voltage and current of battery. The extended Kalman filter (EKF) can affect a highly effective the SOC estimation. In this paper, we discuss a state-of-charge (SOC) estimation system for lithium-ion batteries using EKF with adaptive noise covariance estimation. In the prior art, it was necessary to the test experiments (roughly 1000 Kalman filter processes) in order to find the optimum noise variance setting. Our proposed method can estimate the optimum noise variance setting from the residual error, it is not need the noise setting search experiments. Therefore, it is an efficient and accurate noise setting method for the SOC estimation using EKF.