

# 博士論文要旨

## 論文題名：リチウムイオン蓄電池の効率劣化診断の研究

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  
アリマ マサヒト  
有馬 理仁

本論文は、リチウムイオン蓄電池の経時的充放電エネルギー効率低下の診断手法を提案し、この効率劣化診断がバッテリーアグリゲーションの運用経済性向上につながることを示す。

気候変動対策に向けて再生可能エネルギー大量導入が求められている。その基盤技術として、バッテリーアグリゲーションおよび定置型リチウムイオン蓄電池が期待されている。一方、リチウムイオン蓄電池は劣化により充放電エネルギー効率が低下し、バッテリーアグリゲーションの運用経済性を低下させる。これを防ぐには個々の定置型リチウムイオン蓄電池の充放電エネルギー効率を推定する効率劣化診断技術が必要である。しかし多くの電池容量推定技術の報告事例があるにもかかわらず、充放電エネルギー効率推定技術は報告されていなかった。そこで本研究では新奇にリチウムイオン蓄電池の効率劣化診断手法を構築し、バッテリーアグリゲーション運用経済性改善効果を示すことを目的とした。結果として経済性指標を約 20%向上する方法を解明し、手法の革新性と有効性を示した。

本研究ではまず、差電圧指標を用いた蓄電池劣化モデルを生成し、これを用いた効率劣化診断手法を構築した。また蓄電池の運用経済性の定量的評価指標として SOEc(State of Economy)を提案した。この SOEc を考慮する事によってバッテリーアグリゲーションの経済メリットが 2000 円/kWh 改善する事を示した。これは効率劣化診断による運用経済性改善効果を解明した革新的成果である。

さらに、充放電エネルギーが満充電容量、開回路電圧、内部抵抗の 3 要素に分解できることに着目し、充放電電流に対する効率劣化診断の一般化を検討した。3 要素のモデル式と差電圧指標の関係から蓄電池劣化モデルを生成した。これらをバッテリーアグリゲーションのシミュレーションに適用した。効率劣化診断に基づく効果的運用が太陽光発電余剰電力対策の充放電エネルギー効率を向上し、収益を 8%改善する事を示した。このバッテリーアグリゲーションのシミュレーションモデルは実在する電気自動車および充電器の特性を採用しており、実証性を大きく向上する事ができた。

また、蓄電池劣化モデル生成法について教師データの観点から課題を抽出し、現実のバッテリーアグリゲーションに適した手法を提案した。一つは教師データ低減を狙ったニュー

ラルネットワークである。もう一つは画像処理技術 GFFD を改良した MGFFD による教師無し学習である。MGFFD は特に、運用中の開回路電圧の適応学習法として検討した。10% のオフセット誤差，25% の外乱ノイズを与えても，最終的に 0.7% 未満の誤差で正確な値へと適応する事を示した。開回路電圧を単一の値でなく関数として高精度に適応させる手法は過去に例がなく，革新的である。

以上の各蓄電池劣化モデル生成法を，それぞれの特徴に合わせて有機的に活用することで，リユースバッテリーを含む未知のリチウムイオン蓄電池の効率劣化診断が可能になると考えられる。効率劣化診断によってバッテリーアグリゲーションの運用経済性を向上し，再生可能エネルギー導入拡大を支援して気候変動対策に貢献する事が期待される。

## Abstract of Doctoral Dissertation

### Title: Research of the efficiency degradation diagnosis of lithium-ion batteries

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

アリマ マサヒト  
ARIMA Masahito

This thesis focuses on the time-dependent charge–discharge efficiency degradation of lithium-ion batteries and proposes efficiency degradation diagnosis methods, besides, it is shown that the degradation diagnosis of lithium-ion batteries will lead to an improvement of the operation economy of battery aggregation.

A large amount of penetration of renewable energies are required for the climate change measures. For instance, battery aggregation and lithium-ion battery storage systems are expected as basic technologies of it. Meanwhile, the degradation of lithium-ion batteries deteriorates the charge–discharge energy efficiency and the overall operation economy of battery aggregation. To prevent it, the estimation methods of charge–discharge energy efficiency of each lithium-ion battery, so called ‘efficiency degradation diagnosis’, is necessary. There are many papers related to the battery capacity estimation methods, however, the battery energy efficiency estimation method has not been reported. Therefore, this thesis aimed to establish the novel efficiency degradation diagnosis methods of lithium-ion batteries, and furthermore, to demonstrate an improvement of the operation economy of battery aggregation. Consequently, the method of improving the economic index by about 20 % was elucidated, so that it was showed that the method was innovative and valid.

At first, a battery degradation model using voltage difference indicators was generated, as well, an efficiency degradation diagnosis method based on this model was established. Further, SOEc (State of Economy), as the quantitative evaluation index of battery operation economy, was proposed. It was shown that the economic merit of battery aggregation improves by 2000 JPY/kWh by considering SOEc. This is the innovative achievement that elucidates the improvement of operation economy by efficiency degradation diagnosis.

Then, the electric current generalization of the efficiency degradation diagnosis was investigated by focusing on the charge–discharge energy can be broken down into three components, namely, full-charge capacity, open-circuit voltage, and internal resistance. Besides, battery degradation models were

generated from the relationship between the equations of three components and voltage difference indicators. Thereafter, the models were applied to the simulation of the battery aggregation. It showed the improvement of charge–discharge energy efficiency of photovoltaic energy surplus measurements, consequently 8% increase of economic gain, by the effective operation based on efficiency degradation diagnosis. The demonstrability was greatly improved since the simulation model of battery aggregation have the real characteristics of electric vehicles and chargers.

Moreover, the problems of the generation methods of battery degradation models were extracted from the aspects of the training data, further, the methods suitable for real battery aggregation were proposed. One is neural network aimed for decreasing the amount of training data. The other is the MGFFD learning, without training data, modified from image processing technique GFFD. Particularly, MGFFD was studied as the method of the adaptive learning of open-circuit voltage during operation. The adaption with less than 0.7 % error was demonstrated under conditions of 10 % offset error and 25 % disturbance noises. The accurate adaption method of open-circuit voltage as functions, not as single value, is innovative since it has not been reported.

It is thought that the appropriate cooperation of these generation methods of battery degradation models will lead to the efficiency degradation diagnosis of lithium-ion batteries including unknown re-used batteries. It is expected that the improvement of the operation economy of battery aggregation, that is obtained by efficiency degradation diagnosis, will result in the expansion of renewable energy penetration, and consequently contribute to the climate change restraint.