

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18027

研究課題名(和文) エネルギーデバイスの交流インピーダンス診断機能をもつDC-DCコンバータの開発

研究課題名(英文) Development of DC-DC Converter with AC Impedance Diagnosis Function of Energy Devices

研究代表者

片山 昇 (Katayama, Noboru)

東京理科大学・理工学部電気電子情報工学科・講師

研究者番号：00609373

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、本手法に置ける精度向上を狙いとし、我々の行ってきたインピーダンス診断が可能なDC-DCコンバータによるインピーダンス診断にウェーブレット変換を導入し、時間変化するインピーダンスの取得、さらに時間周波数解析法である短時間フーリエ変換の結果との比較検討を目的とした。次に我々がこれまで提案してきた種々のエネルギーデバイスへの応用や大容量化に対して追加の検討として燃料電池スタックを構成するセルごとの測定の実現と、リチウムイオン電池の充放電サイクル回数とSoCとインピーダンスの関係を調査した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we introduced wavelet transformation to the DC-DC converter with impedance diagnosis function we have developed to obtain time-dependent impedance in order to improve the measurement accuracy, and compared with short time Fourier transformation, which is also used as time-frequency analysis method. Next, to apply our method to various energy devices and to improve its capacity, we realized measurement for each cell in a fuel cell stack, and investigated the relationship between the SoC and the impedance of a lithium-ion battery under various charge-discharge cycle conditions.

研究分野：エネルギー工学

キーワード：交流インピーダンス 燃料電池 太陽電池

1. 研究開始当初の背景

近年、再生可能エネルギーの導入や携帯型デバイスの普及にともない、燃料電池や太陽電池、二次電池などの各種エネルギーデバイスの重要性が高まっており、信頼性の向上も求められている。エネルギーデバイスそのものの耐久性は年々高くなっているものの、不具合を完全に無くすことは難しいため、それらを利用中の診断技術についても同時に検討し、小さな不具合や故障を少しでも早く察知することが必要である。

我々は過去の研究において DC-DC コンバータを用いて入力側に接続されたエネルギーデバイスの交流インピーダンス診断を実現する手法を開発し、燃料電池、リチウムイオン電池、太陽電池への応用を提案してきた。交流インピーダンス診断は対象のデバイスに微小交流電圧を印加して応答電流からインピーダンスを得る方法である。これまでの二次電池で行われていたような電圧をモニタリングするだけの診断よりも多くの情報が得られるため、様々な応用が期待できる。例えば燃料電池や二次電池などの電気化学エネルギーデバイスであれば劣化状態や、温度、電解質の状態を得ることができ、太陽電池のような半導体エネルギーデバイスについてもインピーダンス診断が適用可能であることが示されており、pn 接合のスパッタダメージなどによってインピーダンスが変化することが分かっている。我々の提案する方法では DC-DC コンバータに備えられた回路をそのまま利用できるため、主に制御ファームウェアの変更で実装が可能である。したがってハードウェアの設計にはほとんど手を施す必要がないため、低コスト化も望める。

しかしながら、本手法の実用化のためにはさらなる高精度化必要となる。家庭用や自動車用としての利用が期待されている固体高分子形燃料電池(PEFC)の発電性能は湿度、ガス流量などに左右され、これにともなって変化する内部状態はインピーダンス測定が有効である。しかしこのような内部状態は数秒単位で変化するため、数 Hz オーダーの測定をした場合、その変化はそのまま誤差として現れる。これまでの手法では電圧と電流に高速フーリエ変換(FFT)を適用してインピーダンスを求めているが、FFT では時間情報が失われるため、時間変化するインピーダンスは算出できない。そこで、時間周波数解析法である短時間フーリエ変換(STFT)を導入し、時間変化するインピーダンスの取得を試みる着想に至った。

さらに、先に述べたように本手法は燃料電池に限らず様々なエネルギーデバイスに適用可能であるが、詳細な検討はまだなされておらず、先行研究では単セル等の低電力での検討に留まっていた。したがって、実際にこれらのエネルギーデバイスに適用し、本手法を適用した場合の評価を行う必要がある。

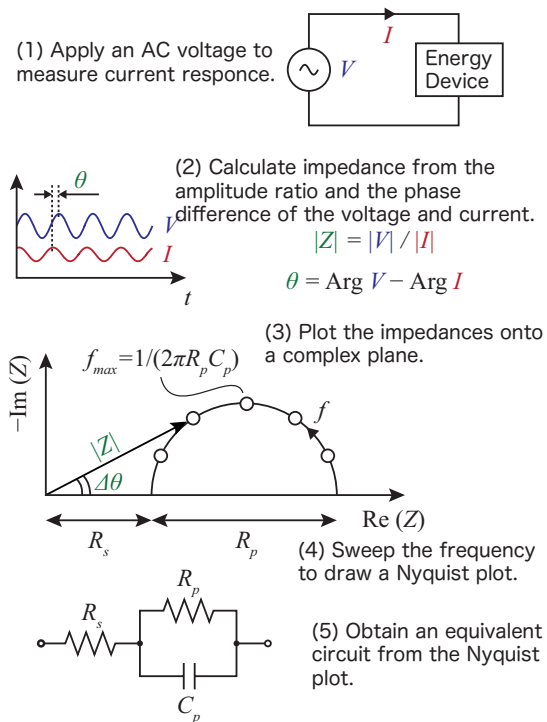


図 1 交流インピーダンス診断の概念

2. 研究の目的

本研究では、本手法に置ける精度向上を狙いとし、我々の行ってきた DC-DC コンバータによるインピーダンス診断にウェーブレット変換を導入し、時間変化するインピーダンスの取得、さらに時間周波数解析法である短時間フーリエ変換(STFT)の結果との比較検討を目的とした。次に我々がこれまで提案してきた種々のエネルギーデバイスへの応用や大容量化に対して追加の検討として燃料電池スタックを構成するセルごとの測定の実現と、リチウムイオン電池の充放電サイクル回数と SoC とインピーダンスの関係を調査した。

3. 研究の方法

図 1 に提案手法で測定する交流インピーダンスについての原理を示す。まず、各種電池など測定対象のエネルギーデバイスに対してある周波数の微小交流信号を印加する。一般的にはエネルギーデバイスは直流で動作するため、実際には動作点付近の直流電圧を基準電圧として上下に電圧を微小変動させる。エネルギーデバイスがインピーダンスを持っていれば、電流についても同じ周波数で振動する。このときの印加電圧と応答電流の振幅比と位相差をとることでその周波数におけるインピーダンスが得られる。さらに周波数を走査し複素平面上にプロットすることで、インピーダンス軌跡(ナイキスト線図)を描ける。ナイキスト線図から等価回路の回路定数を算出することで、エネルギーデバイスの診断に用いることができる。交流インピーダンス法は元来、基礎研究に広く用いられている方法であり、実験室内では周波数特性分析器などを

用いて測定される。しかしながら、エネルギーデバイスが実際に使用されているときには分析器を利用することが困難である。我々はDC-DCコンバータから交流インピーダンス診断を行う方法を提案しており、次に原理を簡単に説明する。

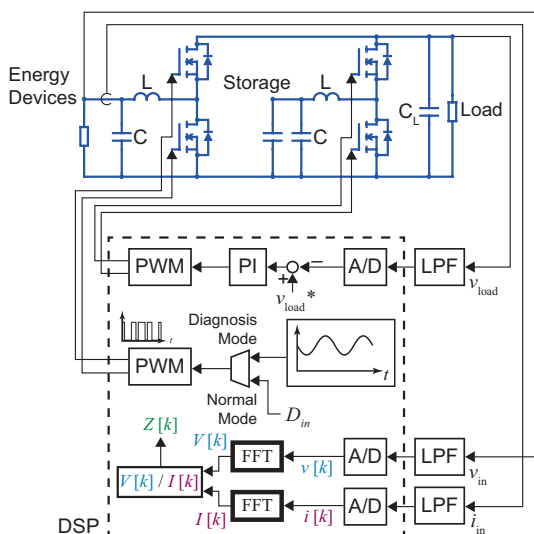


図 2 DC-DC コンバータによる交流インピーダンス診断のブロック図

図 1 に提案する回路とブロック図を示す。回路には基本構成としてはエネルギーデバイスと負荷が接続されるが、診断中においても負荷の電圧を一定に保ち電力を供給する必要がある場合には補助的にEDLCなどのストレージが接続される。エネルギーデバイスと負荷の間には昇圧チョップが接続されている。通常の電力変換回路として動作する際(Normal Mode)には負荷の電圧やエネルギーデバイスの出力等を目的に応じて制御するため、デューティ比  $D_{in}$  を変化させる。エネルギーデバイスを診断する際(Diagnosis Mode)には昇圧チョップのデューティ比として一定の直流バイアス信号に微小な交流信号が印加された信号を入力する。このようにすれば、負荷電圧が一定と仮定すれば、エネルギーデバイスの電圧をデューティ比に比例した値として変化させることができる。交流信号としては図に示すある周波数をもつ正弦波を加えれば、その周波数におけるインピーダンスを測定することになり、周波数を掃引することで、インピーダンス軌跡が得られる。また、交流信号は単純な正弦波以外にも異なる周波数をもつ複数の正弦波を重ねあわせたものとするのも可能である。この場合には後述するFFTにより周波数成分毎に分解するため、一度に複数の周波数におけるインピーダンスを得ることができる。前者の手法は高い精度での測定が可能である利点があるが、周波数を掃引する必要があるため測定時間がかかる欠点がある。後者では測定時間が短縮されるが、精度が低下するおそれがある。

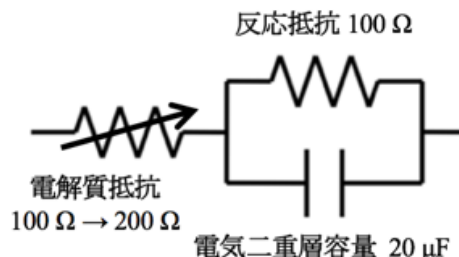


図 3 燃料電池簡易等価回路

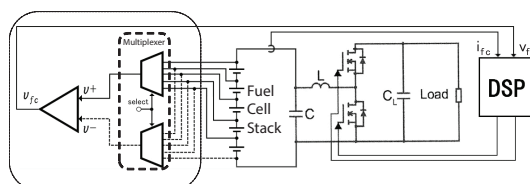


図 4 燃料電池セルのインピーダンス測定のための追加回路

次に、エネルギーデバイスの実際の電圧と電流は電力変換回路に搭載されたA/D変換器等で離散化および標準化されて取り込まれる。取り込まれた電圧および電流信号はそれぞれFFTにより周波数分解され、周波数ごとの振幅と位相に変換される。印加した交流信号の周波数に一致する成分のみを取り出し、複素数表示の電圧および電流の商をとることで、インピーダンスが算出される。これらの処理が終了したら通常の電力変換回路の動作に戻る。一般的に対象の周波数帯が電気化学エネルギーデバイスでは0.1~Hz~10~kHz、半導体エネルギーデバイスでは1~Hz~100~kHzであるが、周波数帯全域にわたって測定を行わなくても等価回路の回路定数の推定は可能であることから、測定時間の短縮が図れ、数秒から数十秒で交流信号の印加からインピーダンスの診断までの処理が完了する。

燃料電池の簡易等価回路を図 3 に示す。この等価回路に複数の周波数成分を持つ微小交流電圧をDC-DCコンバータを用いて印加し、測定した電圧と電流にWTまたはSTFT適用して時間ごとのインピーダンスを取得する。ガス流量の増大や相対湿度の低下とともに、電解質抵抗が増加することが報告されており、本研究では等価回路の電解質抵抗値を変化させることで、PEFCの内部状態変化を擬似的に表現した。

さらに本研究では、インピーダンス診断の燃料電池およびリチウムイオン電池への実用化を目指し、燃料電池に対しては燃料電池スタック内の各セルのインピーダンスの測定、リチウムイオン電池についてはSoCおよびサイクル数の推定について検討を行った。

燃料電池スタックの各セルを測定するための構成を図 4 に示す。ブロック図は省略している。全てのセルは直列接続されているため

電流は電力変換回路の電流センサで取り込む。一方、電圧は各セルを測定する必要があるため、各セルの電圧をマルチプレクサを介して、差動増幅器に入力する。このように各セルを切り替えながら電圧を測定することで、燃料電池スタック内のすべてのセルのインピーダンスを測定することができる。このような手法の動作を確認するために実際の燃料電池スタックを用いて実験した。

燃料電池は有効反応面積  $10 \text{ cm}^2$  のセル 5 枚で構成される固体高分子形燃料電池を使用した。定格出力は  $5 \sim 7.5 \text{ W}$  である。燃料極には無加湿の水素を  $100 \text{ sccm}$  で供給し、空気極は開放型であるため、ファンで室内の空気を供給した。アナログマルチプレクサ(ADG707, Analog Devices)は手動で切り替えた。測定周波数範囲は  $0.12 \sim 61 \text{ Hz}$  の 10 点とし、負荷電圧は  $6 \text{ V}$  とした。また、同条件でインピーダンスアナライザ(SPEC-40026S, 菊水電子工業)で測定した結果と比較した。

次にリチウムイオン電池に関して検討するための実験について示す。リチウムイオン電池はインピーダンスが低いため、電圧の交流信号の振幅が十分にとれず、A/D 変換器の精度が不足する。そのため、一度ハイパスフィルタで直流分を取り除いた上で増幅している。ハイパスフィルタを適用した場合、本研究では低周波域で位相誤差が顕著になるため補正している。リチウムイオン電池(NCR18650PF, Panasonic,  $4.2 \text{ V}/2700 \text{ mAh}$ )を充放電を繰り返しながら、1 サイクルごとに SoC が 25, 50, 75% のときのインピーダンスを提案手法とインピーダンスアナライザ(IM3590, 日置電機)で比較した。図 5 で表す等価回路を仮定し、得られたインピーダンス軌跡から、等価回路の回路定数を求めた。

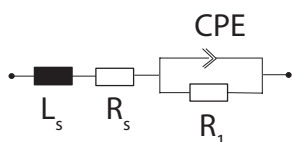


図 5 リチウムイオン電池の等価回路

#### 4. 研究成果

電解質抵抗値を 2 秒付近で  $100 \Omega$  から  $200 \Omega$  に変化させた際に得られた時間ごとのナイキストプロットを図 6 に示す。電解質抵抗変化を反映してナイキストプロットが右に推移している。各変換のナイキストプロットから電解質抵抗値を算出すると図 7 のようになり、WT は実際の抵抗変化に追従するのに対し、STFT は窓幅が広いために変化が遅れている。

図 8 および図 9 は各時間の高周波域 ( $240 \text{ Hz}$ ) と低周波域 ( $3.8 \text{ Hz}$ ) のインピーダンスにおける真値との差分を表したものである。STFT は抵抗変化の際の差分が大きく、その継続時間も長いのに対し、WT は低周波側でのみ差分が大きくなった。

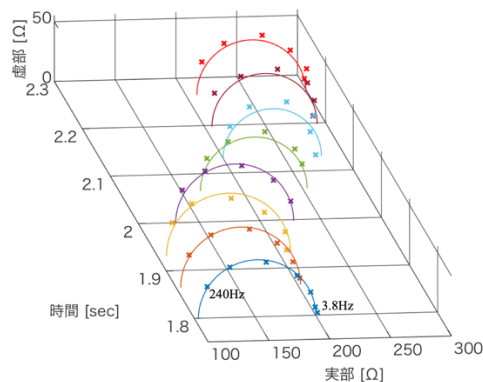


図 6 実験により求めた時間ごとのナイキストプロット

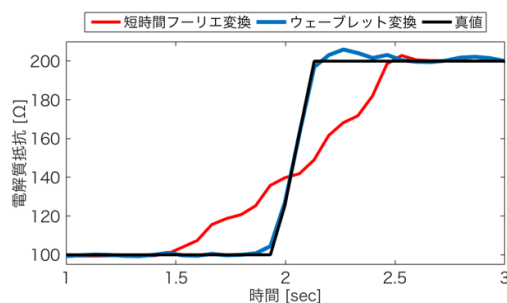


図 7 電解質抵抗変化

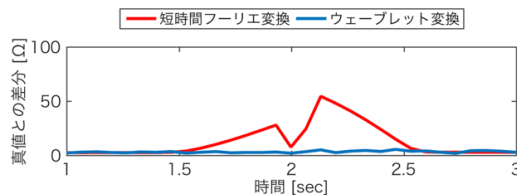


図 8 各時間における  $240 \text{ Hz}$  (最高周波数) のプロットと真値との差分

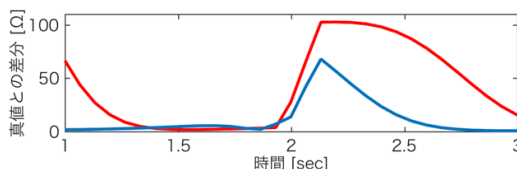


図 9 各時間における  $3.8 \text{ Hz}$  (最低周波数) のプロットと真値との差分

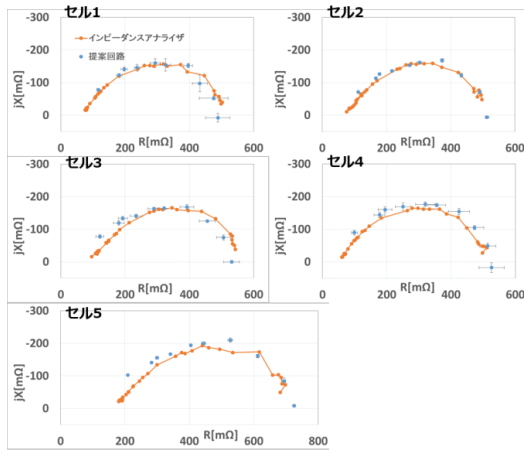


図 10 燃料電池スタックの各セルのナイキストプロット

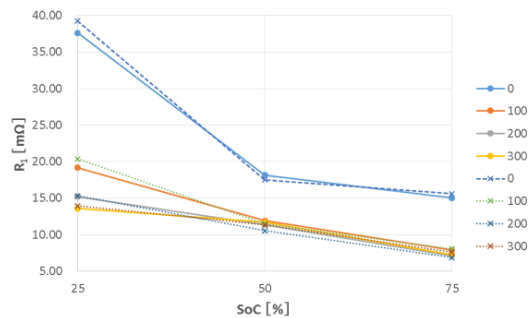


図 11 異なるサイクル数に対する並列抵抗  $R_1$  と SoC の関係

次に燃料電池スタックの個々のセルに対して提案回路によって得られたナイキスト線図を図 10 に示す。便宜上、スタック内の高電圧側から順にセル 1~5 と呼称している。低周波域(右端)において誤差は大きくなるが、すべてのセルにおいてインピーダンスが測定できていることがわかる。セル 5 は他のセル 1~4 と比較してインピーダンスが大きくなっているが、これはセル 5 が水素供給経路の上流にあるため、電解質膜が乾燥した水素によって水分が奪われ、イオン伝導率が低下していることが原因であると考えている。このようなセルごとの不具合の違いも、本手法を用いることでリアルタイムに診断情報を得ることができる。

図 11 にリチウムイオン二次電池のサイクル数ごとの SoC と  $R_1$  の値を関係を示す。SoC が高まるにつれて  $R_1$  が低下していることがわかる。また、サイクル数を重ねる毎にも  $R_1$  は低下することがわかる。 $R_1$  のみでは SoC とサイクル数を同時に推定することはできないが、 $R_1$  がわかれば、 $R_1$  よりもう片方を求めることができる。また、等価回路の他の回路定

数についても同様に検討を行うことで、両方を推定することができる可能性もある。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 3 件)

① 松本俊哉, 片山昇, 小越澄雄, 杉山睦, “DC-DC コンバータを利用したクラックが生じた太陽電池の交流インピーダンス診断” 平成 27 年電気学会産業応用部門大会, 大分大学, 1-105, 2015 年 9 月 2 日.

② 片山昇, 桑原允, 鈴木純平, 小越澄雄, “電力変換回路を用いた様々なエネルギーデバイスのリアルタイム診断” 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, 群馬大学, 1-105, 2016 年 8 月 31 日.

③ 大沢卓, 片山昇, 小越澄雄, “DC-DC コンバータを用いた時間変化するインピーダンスの測定—時間周波数解析の導入—” 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, 群馬大学, Y-10, 2016 年 8 月 30 日.

[その他]

ホームページ等

<http://energylab.jp/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

片山 昇 (KATAYAMA, Noboru)

東京理科大学・理工学部・講師

研究者番号：00609373