

インピーダンスメータ WT1600FC

WT1600FC Impedance Meter

小池 克博^{*1} 数見 昌弘^{*2} 阪田 英資^{*1}
 KOIKE Katsuhiko KAZUMI Masahiro SAKATA Eiji

燃料電池を始めとする電池の内部インピーダンス計測を行うために、インピーダンスメータWT1600FCを開発した。本器は、当社のデジタルパワーメータWT1600をベースに開発され、従来の電力計の優れた機能を継承しながら、インピーダンス測定に必要な機能を追加搭載している。本稿では、WT1600FCの機能・特長、更には電池の内部インピーダンスをより正確に測定するために設計されたハードウェア、ファームウェアの基本構成・動作原理について記述する。またインピーダンス測定結果の収集を容易にし、結果の解析に必要なCole-Cole プロット図の描画を可能にするアプリケーションソフトウェアについても紹介する。

We have developed the WT1600FC impedance meter designed for measurement of internal impedance of fuel cells as well as other batteries. The WT1600FC has been developed based on the WT1600 digital power meter and several new functions necessary for impedance measurements have been implemented, while retaining the excellent functionality of its predecessor. This paper describes the functions and features of the WT1600FC, as well as the basic architecture and operating principles of the hardware and firmware, which are designed for measurement of internal impedance of batteries with higher accuracy. Furthermore, this paper introduces a software application that simplifies the collection of impedance measurement and creates Cole-Cole plots necessary for the analysis of these results.

1. はじめに

地球温暖化やエネルギー資源の有効活用が求められる中、化石燃料に依存しない代替エネルギー利用の普及が急務と言われている。燃料電池は水素と酸素を化学反応させて電気エネルギーと熱エネルギーを作り出すことができ、反応の生成物として得られる物質は水だけという理想的な代替エネルギー手段の電池である。また、携帯電話器を始めとする携帯機器の普及に伴い、Liイオン電池などの携帯機器用電池の需要は急速に伸びている。これらの電池に対する市場の要求は、高性能化、低コスト化、長寿命化など更に強まっている。

このような電池の開発では、出力電流密度と電池電圧との関係、または出力電流密度と電力密度との関係から、電池性能を把握する評価方法に加えて、電池の出力損失を電池内部の抵抗が要因と見なして、その内部インピーダンスを測定する手法もある。WT1600FCは、電力計測

市場で好評を得ている当社のデジタルパワーメータWT1600¹⁾をベースに開発し、電池電圧、電池電流、電力の高精度測定に加え、交流法を利用して電池の内部インピーダンスを測定することを可能とした。WT1600FCの外観を、図1に示す。



図1 WT1600FCの外観

*1 通信測定器事業本部 第1開発本部 プラットフォーム技術部

*2 通信測定器事業本部 第1開発本部 PMK部

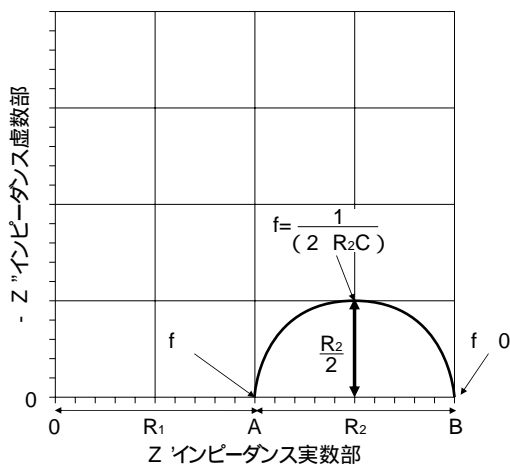


図2 Cole-Cole プロット図の一例

2. 機能・特長

本器の主な機能・特長は、以下の通りである。

(1) 幅広い電池電圧に対応

単セルの電池や数個のセルを直列接続したショートスタック電池のように、電池電圧が10 V以下でその内部抵抗値が数 mΩ と比較的小さい測定対象の電池から、セルを多数直列接続したスタック電池のように 800 V 以下で抵抗値が数 10 mΩ 以上という大規模な測定対象の電池まで、測定端子を切り替えて対応できる。

(2) 広い電流測定レンジ

インピーダンス測定では、直流電流に交流電流を重畳した電流に対して、交流成分だけを取り出して測定する。許容入力電流の範囲は直流成分と交流成分の総和で決まる。本器では、許容入力5 Aと20 A用の2種類の入力エレメントを用意した。許容入力を超える入力に対しては、電流センサを使用して測定することも可能である。

(3) インピーダンス測定周波数範囲

周波数 1 mHz ~ 50 kHz までの範囲で、対数ステップ(1桁当たり log ステップで 20 分割の分解能)で周波数設定できる。そのため、Cole-Coleプロット図を描画する際、測定点を均一にプロットすることができる。図2に、Cole-Coleプロット図の一例を示す。Cole-Coleプロット図は、x軸をインピーダンスの実数部、y軸を虚数部にとり、周波数をパラメータとして、インピーダンスの軌跡をプロットした図である。Cole-Coleプロットが図2のようにプロットされた場合、電池の内部インピーダンスは、簡易的に図3のような等価回路に置き換えることができる。R1はA点の抵抗分を、R2はB-A点の抵抗分と等価となり、容量Cは周波数fとR2から決まる等価容量となる。

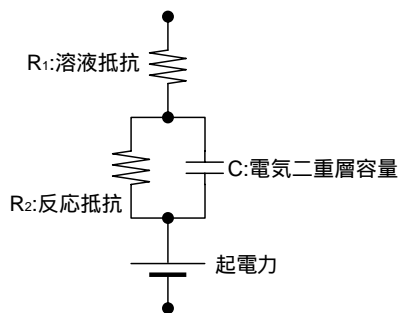


図3 電池内部インピーダンス等価回路の一例

(4) 電子負荷装置または電源装置の制御機能

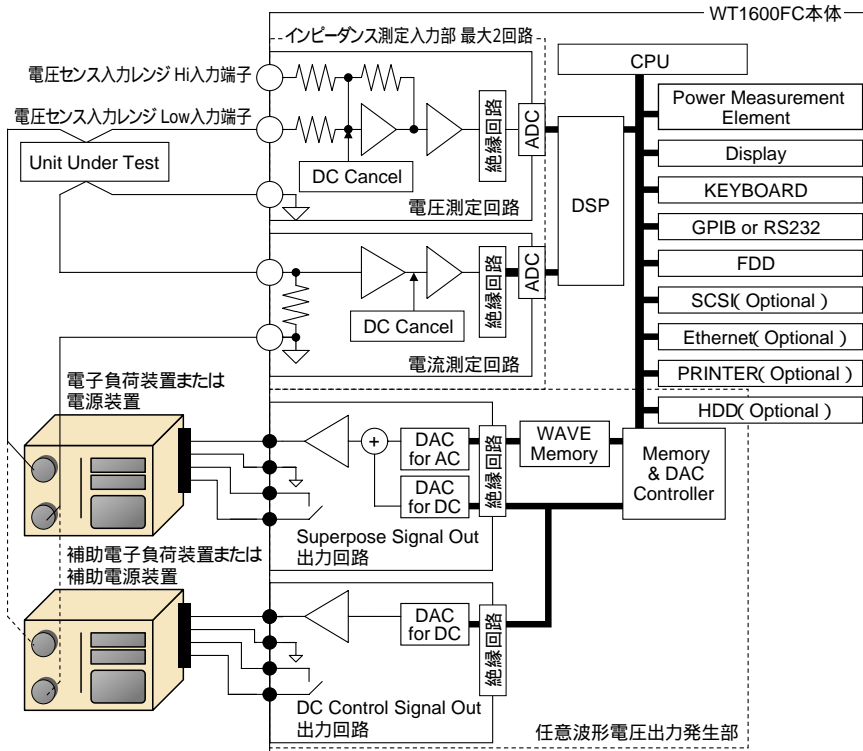
電池の内部インピーダンスを測定するためには、測定対象電池から電流を出力させる必要がある。本器は、任意信号発生機能を使って、アナログ信号で汎用の電子負荷装置または電源装置を制御し、電池から出力させる電流を調整して測定を実現する。組み合わせる装置に必要な機能は、アナログ入力に応じて出力電流を制御可能なことである。本器の測定範囲は 1 mHz から 50 kHz であるが、実際の測定可能な周波数は電子負荷装置や電源装置の特性に依存するので、注意が必要である。但し、周波数特性が負荷装置の特性で減衰や遅れを生じてインピーダンス測定入力回路で電流を測定しているため、制御誤差が測定誤差に直接関与することはない。

(5) スイープモード測定とパターンモード測定

インピーダンス測定では、電池から出力される正弦波電流とこの電流が電池の内部インピーダンスに流れることによって生じる電圧降下を測定し、その周波数における電池の内部インピーダンスを演算する。本器は一般的なインピーダンスメータと同様に正弦波を使った測定が可能で、アプリケーションソフトウェアで正弦波の周波数を変化させて、前述のCole-Coleプロット図を描画する(スイープモード測定)。更に、任意の周波数の正弦波を複数重畳させたひずみ波電流とそのひずみ波電流によって生じる電池の電圧降下から、一度に複数の周波数成分のインピーダンスを同時測定することもできる(パターンモード測定)。パターンモード測定を利用した場合、例えば測定対象の電池のふらつきが大きく刻一刻とその状態が変化してしまうような場合には、データの同時性という観点から非常に有効である。また、1 mHz から周波数をスイープして測定するような場合、低周波領域における測定時間を短縮することができる。

(6) 最大2箇所インピーダンスを同時測定可能

インピーダンス測定エレメントを、2つ同時に実装することが可能である。各測定エレメントは完全に絶縁されているため、例えば、セルのアノードおよび



補助電子負荷装置または補助電源装置は電流量が1台では不足する時に使用します。

図4 WT1600FCのブロック図

びカソードにおけるインピーダンスの同時測定や、スタックされた電池の任意のセルに着目して、2箇所同時に測定することも可能である。また、特性が既知の基準電池と被試験電池を相対比較することもできる。

- (7) インピーダンス測定と電池電圧、電流の同時測定
インピーダンス測定エレメントと電力測定エレメントを装備するモデルでは、インピーダンス測定と同時に、電池の直流電圧および直流電流を測定することが可能である。
- (8) 不安定な電池に対するインピーダンスの高精度測定
本器では、フーリエ演算で特定周波数成分のみを分離してインピーダンス測定を行う。そのため、電池電圧にふらつきや外来ノイズがあっても、所望の周波数のインピーダンスを正確に検出し測定できる。電池の電圧降下分を測定する電圧センス入力をオートレンジに設定した場合、オートレンジ動作はレンジアップのみとしている。電池電圧が不安定な状態でレンジダウン動作を行うと、頻りにレンジ変更が行われ、無駄な測定時間を損失することになるためである。この動作は、電池固有の測定上の問題点を解決した、インピーダンス測定に特化した機能である。

3. 基本構成・動作原理

図4に、WT1600FCのブロック図を示す。本器は、インピーダンス測定入力部と任意波形電圧出力発生部以外はWT1600とほぼ同様であるため、ここではWT1600と相異なる構成についてのみ記す。

3.1 インピーダンス測定入力部

交流のインピーダンス測定では、電池電圧と電池電流の直流成分は測定に不要である。負荷状態における電池の内部インピーダンスを測定する場合、電池から負荷となる直流電流を導通した状態で微小の交流電流を重畳させるのが一般的である。測定のための交流成分は電池にとっては外乱となるので、極力交流成分を少なくする必要があるのである。インピーダンス測定では、重畳させ

た微小の交流電流と、電池内部インピーダンスに交流電流が流れることによって生じる僅かな交流的な電圧応答信号のみを検出することになる。従って、交流成分は直流成分に比べて非常に小さい。交流成分を高精度で取り出すためには、電圧、電流各測定回路で直流成分を除去する必要がある。DC Cancel部では、直流成分を除去するために、DAコンバータ(DAC)を利用した信号減算方式を採用している。比較的簡単に直流成分を除去可能な微分回路を利用したアナログ方式も考えられたが、電池評価では周波数1 mHzまでのインピーダンス測定の要求があったため、アナログ方式では原理的に限界があった。

DACを使用したDC Cancel部では、直流成分を正確に検出する必要がある。インピーダンス測定において電圧レンジ、電流レンジが共に微小レンジに設定されている場合、そのレンジの数百倍もの入力レベルの直流成分を瞬時に検知し、短時間で最適な直流成分除去処理を行うことは困難である。本器では、図5に示すシーケンスに従って、直流成分の瞬時検知、直流除去を行っている。図5では、電圧センス入力レンジHighの測定レンジを使用し、150 mVレンジに変更要求があった場合を例にして説明する。測定レンジ変更要求があると、CPUは測定レンジを一度最大レンジ(電圧センス入力レンジHighの測定最大レンジは100 V)に設定し、直流成分の測定を行う。このときのDC Cancel部のDAC設定値は、初期値ある

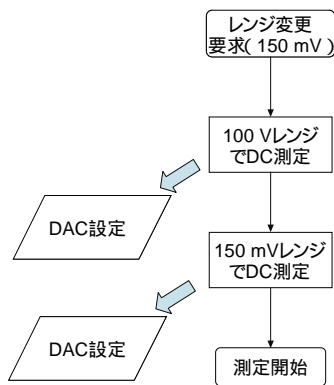


図5 直流成分除去処理のシーケンス

いは前回設定された値である。その測定された直流成分を基に、DAC値を設定する。もし、100 Vレンジでも測定不可能な直流成分が入力されている場合は、DACにレンジ最大値である100 V分の直流成分相当値を加算し、再度直流成分の測定を行う。この動作を繰り返し直流成分が適正範囲に入った時点で、変更要求のあった測定レンジ(150 mVレンジ)に戻す。次に、150 mVレンジで直流成分が測定に必要な適正範囲に収まるまで再度直流成分測定を繰り返し、DAC設定値を決めている。

3.2 任意波形電圧出力発生部

任意波形電圧出力発生部の基本構成は、当社のファンクションジェネレータFG300⁽²⁾と同様である。異なる点は、DACを含めたアナログ回路部分を絶縁構成としている点である。これは、測定対象の電池と測定系(本器、電子負荷装置、パソコンなど)を接続した時に生じる測定ループによる不要な測定系電流の回り込みを防止し、高精度で安定した測定を実現するためである。

発生部から出力されるアナログ電圧信号は、電池から電流を出力させるための電子負荷装置負荷電流制御信号として使用する。発生部は、2チャンネル構成となっている。Superpose Signal Out出力回路は、直流を含めた $\pm 10V$ までの任意の電圧波形を出力することが可能である。この出力信号を使用して汎用電子負荷装置の負荷電流を制御することで、出力信号波形に比例した電流を、電池から出力することができる。DC Control Signal Out出力回路は、 $\pm 10V$ までの直流電圧を出力することが可能である。Superpose Signal Outで制御している電子負荷装置だけでは、電流容量が不足する場合など、電子負荷装置を並列接続運転する際の制御に使用する。

4. アプリケーションソフトウェア

インピーダンス測定結果の収集を容易にし、結果の解析に必要なCole-Coleプロット図の描画を可能にするために、専用のアプリケーションソフトウェアを用意してい

る。アプリケーションソフトウェアの特長は、以下の通りである。

(1) 複雑な測定を簡単手軽に制御

インピーダンス測定に必要な各種設定が簡単に可能
スイープモード測定時、重畳する正弦波電流の周波数を変化させながらインピーダンス測定が可能
パターンモード測定時に必要なひずみ波形の作成
測定対象の電池に対して急激な負荷変動を避けるため、インピーダンス測定開始時に、緩やかに負荷を変動させるソフトスタート機能搭載
測定結果のリスト表示およびCole-Coleプロット図の描画

(2) 上位パソコンからの制御機能

燃料電池などのように、温度、湿度、燃料混合比などの動作条件を制御している上位パソコンから、本アプリケーションを搭載したパソコンを制御することができる。上位パソコンからは、以下の制御が可能である。

予め作成されたインピーダンス測定条件ファイルから、任意のファイルを指定

パターンモード測定の際、予め作成されたひずみ波ファイルから、任意のファイルを指定

インピーダンス測定の開始/終了の指示

(3) 等価回路の定数フィッティング

得られたCole-Coleプロット図に対して等価回路モデルを選択することで、回路の各定数をフィッティングすることが可能

(4) モータ評価分野への応用

電池の特性評価分野だけでなく、モータ実動作領域でのモータ回転子の回転角毎のインピーダンス測定というような、モータ分野へのアプリケーションの展開も考えられる。

5. おわりに

インピーダンスメータWT1600FCの機能、特長、基本構成および動作原理について、概要を述べた。燃料電池を始めとした種々の電池開発に対して、開発効率の向上、更には地球温暖化防止の一助として活用されることを期待したい。

参考文献

- (1) 岩瀬久 他, " デジタルパワーメータWT1600 ", 横河技報, Vol. 46, No. 1, 2002, p. 27-30
- (2) 小柳伸男 他, " ファンクションジェネレータFG200/FG300 ", 横河技報, Vol. 39, No. 3・4, 1995, p. 141-144
- (3) 数見昌弘, 小池克博, " 交流法インピーダンス計測方法とインピーダンスメータWT1600FCの開発 ", 燃料電池, Vol. 3, No. 2, 2003, p. 68-70