

車両駆動用主回路蓄電池の電圧電流脈動測定による 内部抵抗把握手法

尾崎 興介* 田口 義晃** 渡邊 有人**

A Method of Internal Resistance Estimation by Measuring Ripple During Charging for Traction Battery

Kosuke OSAKI Yoshiaki TAGUCHI Aruto WATANABE

We developed a method for calculating internal resistance using RMS values of ripple voltage and current in charging process of a traction battery. Since the ripple voltage and current contain many frequency components, we built frequency filters to measure required components. The internal resistance calculated by the developed method was found to be in good agreement with the value calculated using the main frequency components of ripple. The results showed the effectiveness of the developed method using frequency filter and RMS value meter which are small and inexpensive devices.

キーワード：交流架線式蓄電池電車，ディーゼルハイブリッド車両，主回路蓄電池，リップル成分

1. はじめに

近年，非電化区間における老朽化した気動車の置き換えや環境性能向上を目的として，蓄電池のみで走行可能な電車や蓄電池を搭載したディーゼルハイブリッド車両の導入が進んでいる。車両駆動用主回路蓄電池（以下，主回路蓄電池）を搭載した車両は従来の液体式ディーゼル気動車に比べ，主電動機による駆動方式であるため保守性に優れ，電車並みの走行性能を得ることができる。また，主回路蓄電池によりブレーキ時の回生エネルギーを有効活用できるため環境負荷低減に寄与することができる。

近年導入されたこれらの車両の主回路蓄電池には，リチウムイオン電池が搭載されており，車種毎に専用設計となる蓄電池システムのコストは車両全体の経済性を左右する。すなわち，蓄電池を長寿命に使用できれば経済的に有利となり，併せて信頼性確保にもつながる。

リチウムイオン電池は通電サイクルや高温等により容量低下や内部抵抗の増加といった劣化が生じ，蓄電池電車では出力低下や走行可能距離減少の要因になる。ディーゼルハイブリッド車両では蓄電池の最大電力の減少により，回生電力量の減少やエンジン稼働率の増大を生じ，環境負荷増加の要因となる。リチウムイオン電池の交換を計画するためには劣化の進展を把握する必要があり，簡便な手法が望まれる。通常，電池の劣化を把握するためには，定期的に車両を運用から外して現車試験を行う，あるいは車両から電池を取り外して単体試験を行う必要があるため手間を要する。そこで著者らは，主回路蓄電池の充電を行う際に，電圧や電流に交流架線や

ディーゼルエンジンに起因する微小な脈動成分（以下，リップル）が含まれていることに着目し，これを利用することにより内部抵抗を簡便に把握する手法の検討を行った¹⁾²⁾。充電時のリップルを活用できれば，車両の運用中に電池の劣化をトレースし，運用中以外の測定を省略できる可能性がある。本稿では，提案手法の概要について述べたのち，交流架線式蓄電池電車（以下，形式 A）とディーゼルハイブリッド車両（以下，形式 B）を対象とした現車試験による提案手法の評価結果を報告する。

2. 既存の内部抵抗把握手法

リチウムイオン電池の内部抵抗を把握する手法は，所定の通電条件の下で専用機器を用いて測定する手法と，実使用環境での通電条件で試験を行う手法に分けられる。前者はさらに，直流電流を流した際の電圧変化から算出する直流法と，交流電流を流した際の電圧変化による交流法に分けられる。本章ではこれらの特徴と鉄道車両に応用する上での課題を述べる。

2.1 所定の通電による把握

2.1.1 直流法

電池の直流電流値を ΔI [A] 変化させる前と所定時間経過までの電圧変化 ΔV [V] から，式 (1) により直流内部抵抗 R_{dc} [Ω] を算出する。大電流を通電した際の性能評価に適しており，対応する電源装置が必要であるが，汎用の測定器を活用できる。

$$R_{dc} = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (1)$$

* 元 車両技術研究部 駆動システム研究室

** 車両技術研究部 駆動システム研究室

2.1.2 交流法

微小な正弦波交流電流 I [A] を通電した際の電池電圧の交流分 V [V] を測定し、これらの実効値の比で定義される交流内部抵抗 R_{ac} を式 (2) により算出するか、複素数の比である内部インピーダンス Z を式 (3) により算出する。式 (2) による算出は JIS C 8715-1 に規定されており、 $1\text{kHz} \pm 0.1\text{kHz}$ の交流を用いて行う³⁾。電池の出荷検査等で用いられる手法で、比較的安価な測定器で計測できる。式 (3) による算出は複数の周波数を用いて行い、周波数特性を調べる場合に用いられる。情報量が多く内部抵抗の因子を推定できるため、電池材料評価にも活用可能である。なお本稿では、式 (4) に示すように、式 (3) の右辺 \dot{V}/\dot{I} の絶対値をとった V/I より算出した内部インピーダンス Z を厳密値として扱う。また、直流法で測定したもののみを内部抵抗と称し、交流法で測定した場合は内部インピーダンスとして区別する場合もあるが、本稿では煩雑としないために両者をまとめて内部抵抗と称する。

$$R_{ac} = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} \quad (2)$$

$$\dot{Z} = \frac{\dot{V}}{\dot{I}} \quad (3)$$

$$Z = \frac{V}{I} \quad (4)$$

2.1.3 課題点

鉄道用の車載電池は高電圧であるため、測定器が対応できない場合がある他、安全上の理由から測定器の接続が容易でない場合が多い。そのため、測定毎に車両から電池を取り外し、測定の手間を要するとすると、多数かつ高頻度の測定は現実的とは言えない。また、測定には専用の測定器や電源装置が必要であり、そのためのコストが課題となる。経年劣化を把握する目的においては新品時の値に対する相対値が得られればよいため、式 (1) ~ 式 (4) で定義された厳密な指標は必須ではなく、類似の指標で代用できる可能性がある。

2.2 実使用環境の通電による把握

2.2.1 内部等価回路の推定

実使用時に通電される様々な電流変化とそれによる電圧変化を利用して、内部抵抗を電気回路で表現した内部等価回路を推定する手法である⁴⁾⁵⁾。目的に応じて、演算処理がリアルタイムまたは後処理の違い、等価回路定数の数や種類に違いがある。得られた等価回路から式 (3) の周波数特性を近似的に求めることも可能である。

2.2.2 課題点

高精度な推定結果を得るには、通電の実態やノイズ状況に応じた推定アルゴリズムの選択や構築、パラメータ調整が必要であり、現在、特定車種に対応するための推定アルゴリズムを別途開発中である。また、車上記録データを後処理にかける場合は手間を減らす自動化等の配慮も必要となる。

3. 提案する内部抵抗把握手法とフィルタ設計

3.1 提案手法の概要とフィルタ設計方針

本稿では、主回路蓄電池充電時のリップル電圧、電流より、卓越した主成分（以下、主要周波数）近傍を抽出し、その実効値から 2.1.2 項で示した JIS 方式に準じた内部抵抗把握手法を提案する。JIS 方式では、 $1\text{kHz} \pm 0.1\text{kHz}$ の正弦波交流を電池に印加するが、提案手法では充電中のリップルの主要周波数を使用する。

主回路蓄電池充電時には主要周波数以外の不要なリップル成分やノイズ等も重畳しており、これらは実効値演算に誤差を与えるため、なるべく主要周波数近傍を狭い帯域で抽出する必要がある。この際、蓄電池電圧と電流に含まれる直流成分の除去も課題となる。特定の周波数成分を把握、抽出するためにはスペクトラムアナライザ等の専用機器を用いる方法や、フィルタを用いる方法がある。専用機器は比較的簡単に周波数成分を把握できるが、2.1.3 項で述べたように車載環境での測定に不向きである。一方、フィルタは把握する周波数毎に専用設計となるものの、比較的安価で小型であるため、車載環境での測定に適している。また、フィルタにはデジタルフィルタとアナログフィルタがあり、前者は周囲温度や経年変化の影響が小さい利点があるが、本用途では微小なリップル成分の抽出を目的とするため、直流分や同相ノイズを除去するアナログフィルタが前段に必要となることが想定される。一方、後者では直流分や同相ノイズ除去の機能と必要周波数成分を抽出・増幅する機能を一体とした設計が可能であり、構成部品の入手も容易である。そのため今回は、リップルの主要周波数近傍を抽出するためのバンドパスフィルタ (BPF) をアナログ回路にて設計した。

車両形式によって充電時のリップルの主要周波数が異なるため、次節では形式 A、形式 B の各々に対してリップルの主要周波数近傍の抽出に適した BPF の設計について説明する。その後、各形式の現車試験の結果から提案手法の評価について述べる。

3.2 現車試験の測定系とフィルタの設計

3.2.1 交流架線式蓄電池電車

形式 A の主回路蓄電池充電時のリップルの主要周波数は 120Hz であり、交流 60Hz の架線電圧の整流に由来

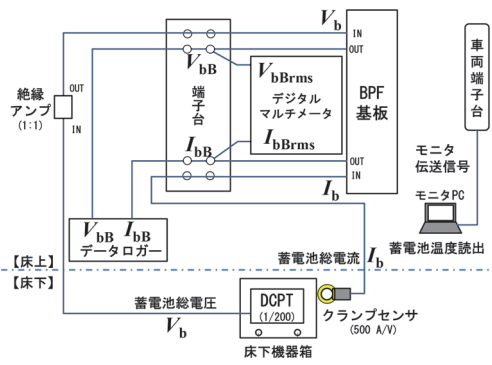


図1 現車試験の測定系 (形式 A)

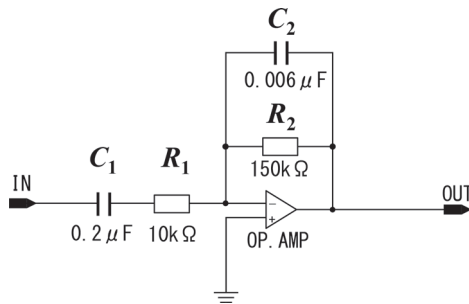


図2 BPF 基板の回路図 (形式 A)

するものである。

図1に現車試験の測定系を示す。 V_b は車両常設の計器用変圧器(DCPT)にて1/200に変換された主回路蓄電池総電圧、 I_b は仮設センサにて500A/Vで取得した主回路蓄電池総電流である。これら V_b 、 I_b から主要周波数である120Hz近傍のリプルを抽出し、利得20dB程度を得るために、図2に示すオペアンプを使用したBPF回路を設計、実装した。BPF基板の出力を V_{bb} 、 I_{bb} とし、波形をデータロガーにて取得、並びにその実効値を V_{bbRms} 、 I_{bbRms} としてデジタルマルチメータにて取得した。また、内部抵抗の温度依存性を把握するため、蓄電池温度を車両モニタ装置への伝送線より取得した。

3.2.2 ディーゼルハイブリッド車両

形式Bでは、車両が静止状態における充電時のエンジン回転数は充電率(SOC, State of Charge)に応じて1N発電とアイドルアップ発電の2つのモードが自動的に切り替わり、これに応じて充電電流値も変化する(充電電流値:1N発電 > アイドルアップ発電)。文献2の結果から、充電時のリプルの主要周波数は1N発電時で113Hzと300Hz、アイドルアップ発電時で45Hzと90Hzであり、これらはエンジン回転に起因するものである。

図3に現車試験の測定系を示す。 V_b は蓄電池配線より直接取得し、絶縁アンプで1/200に変換した主回路蓄電池総電圧、 I_b は仮設センサにて500A/Vで取得した主回路蓄電池総電流である。取得した V_b 、 I_b から主要周波数近傍のリプルを抽出するためにBPF基板へ入力、その後

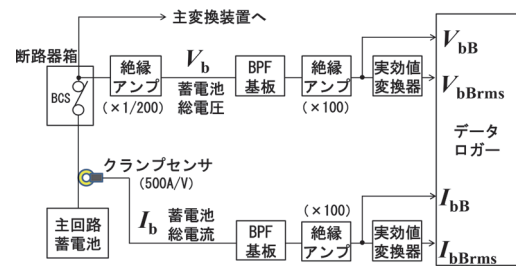


図3 現車試験の測定系 (形式 B)

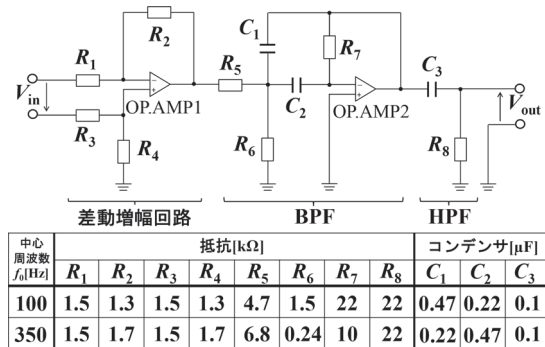


図4 BPF 基板の回路図 (形式 B)

絶縁アンプで100倍に増幅した信号をそれぞれ V_{bb} 、 I_{bb} とした。形式Bの測定では V_{bb} 、 I_{bb} の実効値をより正確に測定するために実効値変換器を使用し、出力された演算値 V_{bbRms} 、 I_{bbRms} はデータロガーにて記録した。蓄電池温度は、運転台の車両モニタ装置の表示にて取得した。現車試験における測定機器や試験時間等の制約を考慮し、アイドルアップ発電時の45Hz近傍の測定は除外した。

図4にBPF基板の回路図を示す。BPF基板は、1N発電時113Hz近傍とアイドルアップ発電時90Hz近傍の測定用の中心周波数 $f_0=100\text{Hz}$ のものと、1N発電300Hz近傍の測定用の $f_0=350\text{Hz}$ のものを設計、実装した。形式Bでは、実際に測定する信号はリプル電圧で0.01Vオーダー、リプル電流で0.001Vオーダーと微小であり、観測ノイズや使用するオペアンプのオフセットが測定結果に影響するためこれらを見逃すことができない。そのため、BPF基板には同相ノイズ除去用の差動増幅回路とオフセット除去用のハイパスフィルタ(HPF)を組み込んだ。

4. 交流架線式蓄電池電車の現車試験における提案手法の評価

4.1 測定方法

形式Aの現車試験では、SOC78%を充電完了、15%を放電完了として、充電については蓄電池総電流225A、120A、45A、放電については同225A(いずれも直流成分の指令値)で通電した。測定は、各充電時に V_{bb} 、 I_{bb} をデータロガー(1kHzサンプリング)にて記録、また5

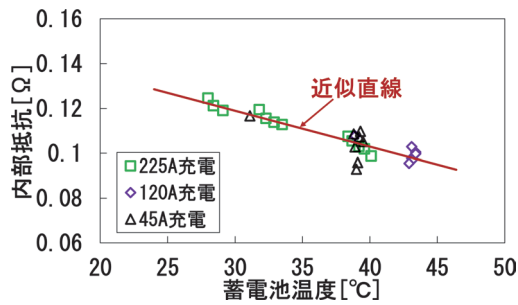


図5 内部抵抗 (Z_{Brms}) と蓄電池温度の関係 (形式 A)

分毎に V_{bBrms} と I_{bBrms} 、蓄電池温度を目視にて読み出した。なお、現車試験は走行を伴わない定置試験であり、充放電回数を確保するために、放電は空調等の補機負荷に加え、パンタグラフを介して架線へ回生する方法としており、実際の走行時の放電方法とは異なる。

4.2 提案手法による内部抵抗の算出

提案手法による内部抵抗 Z_{Brms} はデジタルマルチメータより読み出した V_{bBrms} と I_{bBrms} を式 (2) に代入して算出した。図5に算出した Z_{Brms} と蓄電池温度との関係を示す。 Z_{Brms} の近似直線は蓄電池温度上昇に伴って減少する妥当な傾向を確認した。

4.3 提案手法の評価

提案手法によって算出した Z_{Brms} の妥当性を、リップルの主要周波数である 120Hz の電圧振幅と電流振幅から算出した内部抵抗の厳密値との比較、及び直流内部抵抗との温度依存性の比較にて評価する。

4.3.1 リプル主要周波数の振幅による厳密値との比較

リップルの主要周波数 120Hz における内部抵抗の厳密値 $Z_f (Z_{120})$ は、充電時 5 分毎の V_{bB} 、 I_{bB} の時系列データを高速フーリエ変換 (FFT) して得た、電圧振幅 $V_f (V_{120})$ と電流振幅 $I_f (I_{120})$ を式 (4) に代入して算出した (添え字 f : 主要周波数)。

図6に示すように、提案手法から得た Z_{Brms} は、厳密値である Z_{120} とほぼ同等の近似直線となり、両者の差異は 25°C ~ 45°C の範囲で最大約 8.3% と概ね一致することを確認した。実効値による内部抵抗には、BPF で除去しきれない 120Hz 以外の成分も影響しているがその影響は小さく、簡易な実効値ベースの算出値であっても有用であることを示す結果である。

4.3.2 温度依存性の比較

内部抵抗の温度依存性の比較は、新品電池の基礎実験により得られた直流内部抵抗の曲線近似値、図6の Z_{Brms} の直線近似値と厳密値 Z_{120} の直線近似値の3者で行った。直流内部抵抗は厳密な 2.1.1 項の方法で算出を行うが、形式 A では現車試験実施上の制約により、幅広い温度範囲で直流内部抵抗を得ることができなかつ

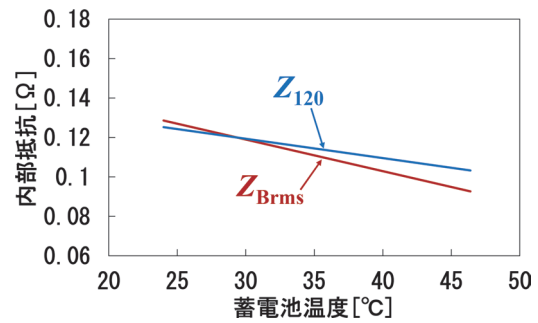


図6 内部抵抗 (Z_{120} , Z_{Brms}) の比較 (形式 A)

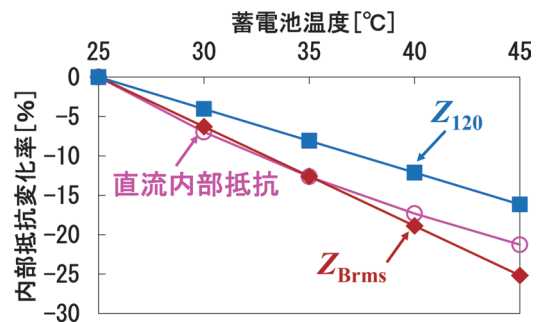


図7 内部抵抗の温度依存性比較 (形式 A)

た。そのため、新品電池の基礎実験により得た直流内部抵抗と比較を行った。また温度依存性の比較のため、内部抵抗値そのものではなく変化率 (%) にて行い、蓄電池温度 25°C 時の内部抵抗値を基準 (0%) として 30°C ~ 45°C までの 5°C 毎の変化率を比較した。

図7に示すように、 Z_{Brms} の内部抵抗変化率と基礎実験における直流内部抵抗の内部抵抗変化率との差異は 5% 程度、現車試験の Z_{120} との差異は 9% 程度と小さく、温度依存性は概ね一致していることを確認した。

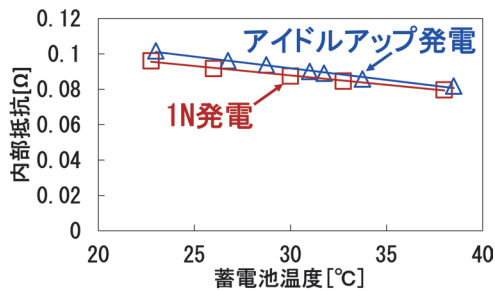
5. ディーゼルハイブリッド車両の現車試験における提案手法の評価

5.1 測定方法

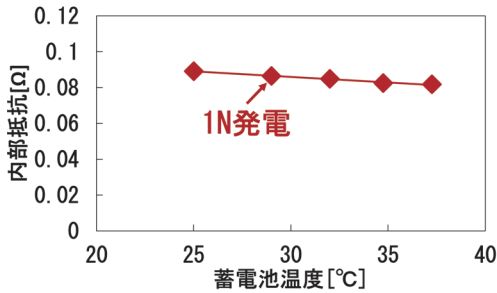
形式 B の現車試験についても走行を伴わない定置試験で行った。充放電は SOC65% を充電完了、20% を放電完了として行った。測定は、充電 1N 発電とアイドルアップ発電時の V_{bB} 、 I_{bB} 並びに V_{bBrms} 、 I_{bBrms} をデータロガー (1kHz サンプリング) にて記録、各充電開始直後の蓄電池温度を目視にて読み出した。なお、放電はエンジンを強制停止として室内灯や空調等の補機負荷にて行った。

5.2 提案手法による内部抵抗の算出

提案手法による内部抵抗 Z_{Brms} はデータロガーにて計測した各充電開始直後の V_{bBrms} と I_{bBrms} を式 (2) に代入して算出した。図8に算出した Z_{Brms} と蓄電池温度との関



(a) $f_0=100\text{Hz}$ BPF



(b) $f_0=350\text{Hz}$ BPF

図8 内部抵抗 (Z_{Brms}) と蓄電池温度の関係 (形式 B)

係を示す。形式 A 同様に、 Z_{Brms} の近似直線は蓄電池温度上昇に伴って減少する妥当な傾向を確認した。

5.3 提案手法の評価

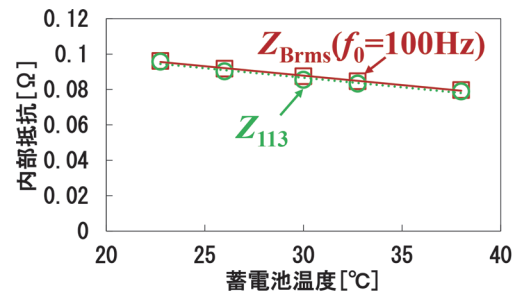
形式 A 同様、提案手法によって算出した Z_{Brms} の妥当性を、リップルの主要周波数の電圧振幅と電流振幅から算出した内部抵抗の厳密値との比較、及び直流内部抵抗との温度依存性の比較にて評価する。

5.3.1 リプル主要周波数の振幅による厳密値との比較

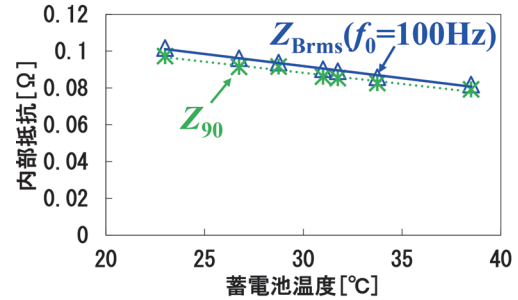
リップルの主要周波数における内部抵抗の厳密値 Z_f は、各充電開始直後の V_{bb} 、 I_{bb} の時系列データを FFT 処理して得た電圧振幅 V_f と電流振幅 I_f を式 (4) に代入して算出した。図 9 に提案手法にて算出した Z_{Brms} と厳密値 Z_f との近似直線の比較を示す。いずれも厳密な Z_f の近似直線と提案手法による Z_{Brms} の近似直線はほぼ一致した。形式 B ではリップルの振幅が形式 A よりも一桁以上小さいが、提案する実効値ベースの算出値は有用であることを示す結果である。

5.3.2 温度依存性の比較

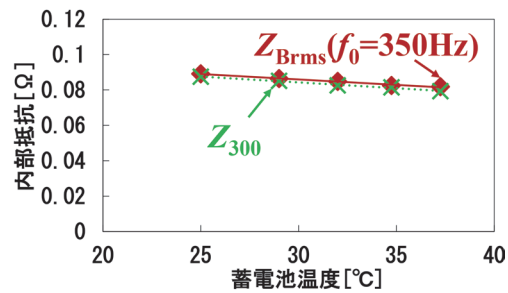
内部抵抗の温度依存性の比較は、現車試験における直流内部抵抗 R_{dc} の直線近似値と図 9 の各 Z_{Brms} の直線近似値の 4 者にて行った。現車試験における直流内部抵抗 R_{dc} は、充電打ち切り直前と充電打ち切り 1 分後における蓄電池総電圧値の差分、総電流値の差分から式 (1) を用いて算出した。蓄電池温度 25°C 時の内部抵抗値を基準 (0%) として 30°C~40°C までの 5°C 毎の変化率を比較した。図 10 に示すように、 R_{dc} と $f_0=100\text{Hz}$ BPF 基板による Z_{Brms} の内部抵抗変化率の差異は 5% 以下と温



(a) 1N 発電 Z_{113} ($f_0=100\text{Hz}$ BPF)



(b) アイドルアップ発電 Z_{90} ($f_0=100\text{Hz}$ BPF)



(c) 1N 発電 Z_{300} ($f_0=350\text{Hz}$ BPF)

図9 内部抵抗 (Z_f , Z_{Brms}) の比較 (形式 B)

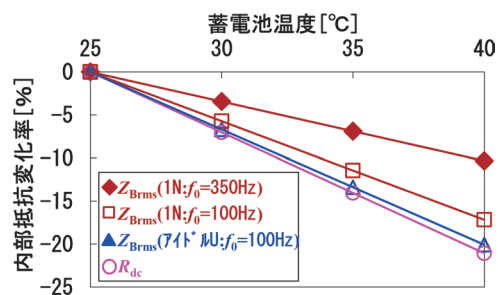


図10 内部抵抗の温度依存性比較 (形式 B)

度依存性は概ね一致している一方で、 $f_0=350\text{Hz}$ BPF 基板による Z_{Brms} の内部抵抗変化率は前者と比較して緩やかとなった。これは、リチウムイオン電池の実際の周波数特性が現れたものと考えられる。

6. 提案手法の活用性と課題

6.1 提案手法の活用性

提案手法である主回路蓄電池充電時のリップルの実効値

により算出した内部抵抗は、蓄電池温度 25℃～40℃程度の範囲において、主要周波数の振幅により算出した厳密値と概ね一致することを確認した。これは FFT 分析等を用いることなく、周波数フィルタと実効値演算機能のみで内部抵抗を把握できる可能性を示している。温度依存性を利用して統一した温度での値に換算すれば、提案手法による内部抵抗が経年変化を把握するための相対的な指標となる可能性が高い。以上より、主要周波数近傍のリプルを抽出するシステムを実車両へ搭載し、車載装置等が主回路蓄電池の内部抵抗をリアルタイム算出、記録することで経年変化をトレースできる可能性がある。提案手法は、主回路蓄電池充電時のリプルの主要周波数を把握、抽出することで、主回路蓄電池を搭載した他の車種においても適用可能と考える。

6.2 実現に向けた課題

本稿では、提案手法による内部抵抗の評価を、現車試験における厳密値との比較及び直流内部抵抗との温度依存性の比較にて行ったが、専用機器を用いた厳密な精度評価を別途行うことが望ましい。また、提案手法による内部抵抗の経年変化トレースについては精度評価に至っておらず、厳密な直流内部抵抗と提案手法による内部抵抗とを、電池劣化の進展に応じて逐次比較する必要がある。さらに、充電時のリプルは微小であるため、実車両に適用する際には適用箇所に応じたノイズ対策が別途必要となる可能性がある。

7. まとめ

本稿では、車両駆動用主回路蓄電池搭載車両において充電時の電圧、電流リプルの実効値により蓄電池の内部抵抗を把握する手法を提案し、交流架線式蓄電池電車とディーゼルハイブリッド車両における現車試験による評価を行った。これにより得られた結果を以下に示す。

- (1) 主回路蓄電池充電時のリプルの主要周波数近傍を抽出する BPF 基板を開発して適用した結果、リプルの実効値より算出した内部抵抗は、FFT 分析に基づき厳密に算出した内部抵抗とほぼ一致した。
- (2) リプルの実効値より算出した内部抵抗の温度依存性は、蓄電池温度上昇に伴って減少する妥当な傾向を示した。また、注目するリプルの周波数によっては、厳密な直流内部抵抗と温度依存性が異なる場合があった。

以上より、提案手法を組み込んだシステムを実車両に搭載すれば、別途の試験を行う必要がなく、車両運用中に内部抵抗の経年変化をトレースできる可能性が高い。

今後は、提案手法による内部抵抗値の評価を深度化するため、専用機器を用いた厳密な精度評価や、経年変化をトレースした際の精度評価を行っていく予定である。加えて、提案システムをより小型で安価に構成し、耐ノイズ性能を向上させるため、汎用マイコンの活用を検討中である。

提案手法が将来、状態監視システム等に活用され、主回路蓄電池の劣化状況を把握する一助となれば幸いである。

謝 辞

本研究における現車試験の実施にあたり、九州旅客鉄道株式会社関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) 尾崎興介, 渡邊有人, 田口義見: 交流架線式蓄電池電車で主回路蓄電池の充放電時のリプル測定による内部抵抗把握手法の検討, 電気学会 交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会, TER-22-003, LD-22-003, pp.13-18, 2022
- 2) 尾崎興介, 渡邊有人, 田口義見: ディーゼルハイブリッド車両用主回路蓄電池の充電時のリプル測定による内部抵抗把握手法の検討, 電気学会 自動車/交通・電気鉄道合同研究会, VT-22-013, TER-22-068, pp.15-20, 2022
- 3) JIS C 8715-1: 産業用リチウム二次電池の単電池及び電池システム-第 1 部: 性能要求事項-, 6.5 内部抵抗, 日本産業規格, 2018
- 4) 田口義見, 小笠正道: 架線ハイブリッド電車でリチウムイオン電池の充電率推定手法, 鉄道総研報告, Vol.26, No.10, pp.35-40, 2012
- 5) 田口義見, 門脇悟志, 吉川岳, 加藤宏和, 佐藤賢司, 関野正宏, 月原達也, 吉川賢一: 鉄道車両制御回路用リチウムイオン電池の劣化診断手法基礎検討, 令和 3 年電気学会全国大会, No.5-158, pp.259-260, 2021