

直流電気鉄道における電力補完装置の開発経緯

Progress in Development of Power Compensator for DC Railway System

石 井 順*

Jun Ishii

West Japan Railway Co.,
2-4-24, Shibata, Kita-ku, Osaka 530-8341 Japan

Abstract

A prototype energy storage system with lithium ion battery has been developed in ca. 1/6 scale as a power compensator for DC railway. A numerical model was successfully proposed for a final design of the actual system in which DC/DC converter is installed to be simply expressed by a current source. The battery mode concerned with characteristics and life performance was also established by taking into account the state-of-charge dependency of the battery voltage and its internal resistance. The proposed system was verified to be effective for its practical application by the filed test result showing the good consistence with the simulated calculation based on simplified electronic circuit diagram model of substation support equipment.

Key words: D.C.railway; Regenerative brake; Power compensator; Lithium-ion battery; EMTP

1 はじめに

直流電気鉄道には、電車のパンタ点電圧の変動幅が大きいという特徴（課題）があり、変電所間隔およびき電回路構成の適正化に努めてきた。その中で、変電所中間付近に位置する駅において、電車が起動するときに発生する架線の電圧降下を緩和するために変電所補完装置を開発し、その装置が変電所中間付近で発生する短時間電圧降下対策に有効なことを実証後、実運用している。

一方、車両においては従来からの発電ブレーキの代

わりに回生ブレーキシステムが完成し、数多く導入されている。この回生ブレーキの普及は、き電系に新たな問題を発生させた。回生時にき電電圧が上昇する現象である。この現象は、先の電圧降下と同じく、き電回路の抵抗に起因するものである。すなわち、オームの法則が示すとおり、電気抵抗を有する電線に通電することにより発生する電圧降下が原因であり、超電導電線をき電回路に使用しない限り問題は解決しない。

しかしながら、筆者は、き電回路の電流を低減することにより電圧降下を緩和する方法を考案することができた。すなわち、回生ブレーキ時に発生する回生電力を、き電回路（き電線）で送電するときに発生する電圧上昇を抑制するために、その送電電流を充電回路

* (株)西日本旅客鉄道

に分流し、逆に電車が力行するときには、変電所からの送電電流を減じるために、負荷電流を蓄電媒体から放電して分担し、その電圧降下を低減する装置（変電所出力の電力を低減できるので電力補完装置と名づけた。以下、電力補完装置という。）である。これにより、電車の運動エネルギーは、一時的に電力に変換されるが、再び、電車の運動エネルギーに戻ることが可能となった。このことは、回生ブレーキ時の電流および力行時の通電が大幅に低減されて、き電線の電圧変動が抑制できることに加えて、大きな省エネルギー効果を生み出すことができることを意味する¹⁾。本稿では、その電力補完装置の開発経緯についてのべる。

2 直流き電方式の特徴

直流き電方式では、変電所の出力を正極は電車線路に、負極はレールに接続している。したがって、長距離のき電系統では複数の変電所が並列に接続されることになる。この接続方式を並列き電方式といい、電流を分散し電圧降下を抑制する効果があるために広く適用されている。Fig. 1に示す並列き電方式の概念図において、電圧降下の最大値が発生するのは変電所中間位置である。しかし、電車線路に流れる電流は両方の変電所から半分ずつ供給されるため、電圧降下は1/2となる。

3 直流き電方式の課題

直流き電方式では、電動機の絶縁性能から比較的、低い電圧を採用している。したがって、電車の長編成化や高速化によるき電回路の電流増加は、き電電圧の低下をもたらす問題として顕在化してきている。このき電電圧低下対策として、電車線路の抵抗を下げるために、き電線の増設や、変電所の新設により対処してきた。しかし、Fig. 2に示す変電所新設による対策は効果が大きい反面、工事費・工期の面で負担が大きすぎるため、運転の工夫（ノッチ制限）により電圧降下を回避することも考慮してきた。

4 変電所補完装置の開発

筆者は、新たな電圧降下対策として電車線路の電流を低減することにより電圧降下を抑制できる変電所補完装置を開発した。この変電所補完装置の概念をFig. 3に、その外観をFig. 4に示す。Fig. 3の V_s は、変

電所補完装置の定格出力電圧を示し、電圧降下の許容限度を下回らないように限定的に出力する特性を有している。この変電所補完装置は、1999年3月紀勢線の樁駅構内に設置し、同駅における特急の行違い運転時の短時間電圧降下時に効果的に出力し、変電所から

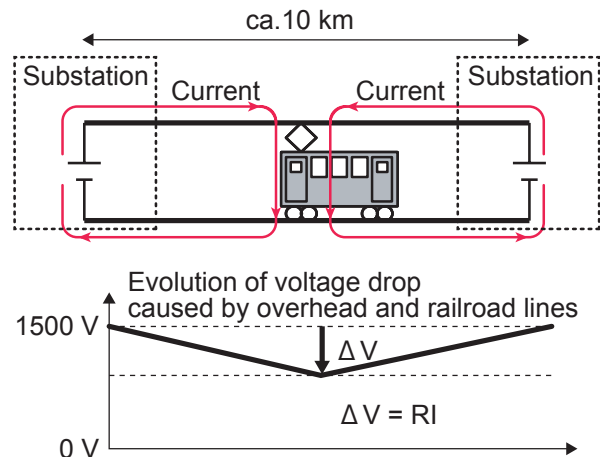


Fig. 1 Schematic diagram for DC feeding system.

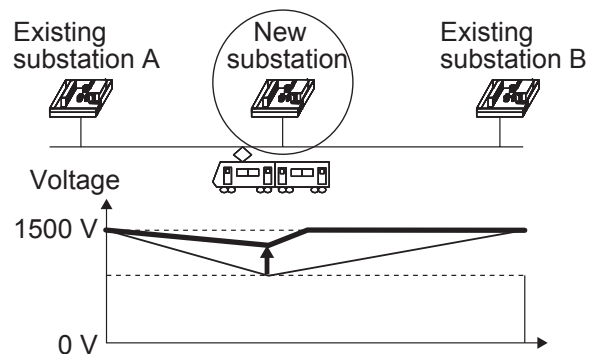


Fig. 2 Effect of new substation establishment.

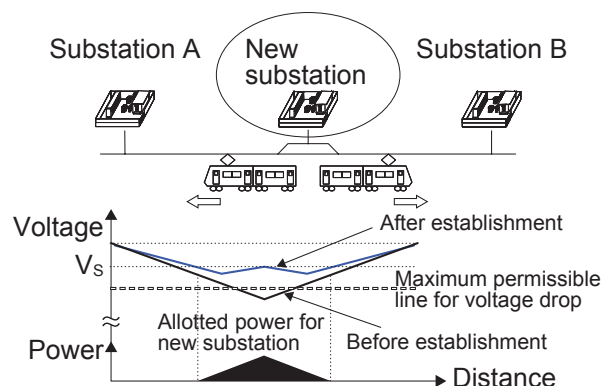


Fig. 3 Functional diagram for substation support equipment.

の送電電流を低減することにより電圧降下を緩和している。

5 新たな電圧変動抑制への取組

変電所補完装置は、電圧降下対策としては有効であることが実証されたが、回生電力による架線電圧上昇には効果がない。しかしながら、その装置の開発試験により、短時間電圧降下時に効果的に出力できる特性を得ることができた。さらに、筆者は回生絞込み制御と協調した、回生電力を回収することにより架線電圧上昇を制御できる電力補完装置を試作した¹⁾。この補完装置を駅の構内に設置することによって、停止時の回生ブレーキにより発生する電力を一時的に貯蔵し、発車時に放出することができることを確認することが



Fig. 4 External appearance of substation support equipment.

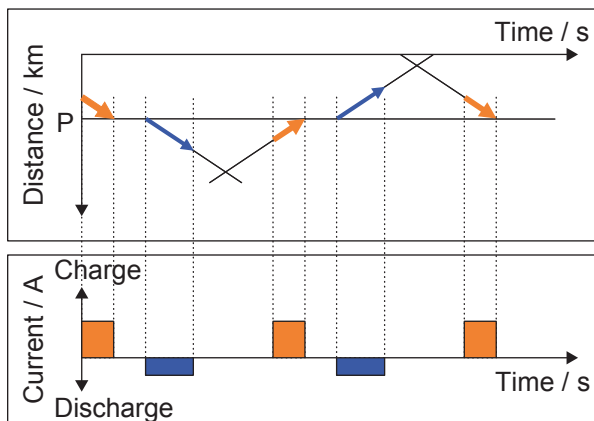


Fig. 5 Charge and discharge cycle during stopping-starting of electric train.

できた。その停止時の充電と発車時の放電サイクルの概要を Fig. 5 に示す。この充放電サイクルによる電流は、停車と発車の同時性を実現するものであり、車両の回生ブレーキシステムとの協調による省エネルギー効果は非常に大きくなると考えられる。

6 電力補完装置の試作

6.1 電力貯蔵媒体

プロトタイプ電力補完装置は一時的に電力を貯蔵する媒体にエネルギー密度の高いリチウムイオン電池を採用した。Table 1 にプロトタイプ電力補完装置用の産業用大形リチウムイオン電池 LIM60H と特性試験用 LIM3 の仕様を示す。Fig. 6 には Fig. 5 に示すパルス電流による充放電パターンを繰り返した場合の充電深度と電池電圧の軌跡を示した。リチウムイオン電池 LIM60H を 600 A (10 C) で SOC = 12% から充電し、その後、Fig. 5 に示すようなパターンで 300 A (5 C) 放電するサイクルを繰り返した。その結果、充放電電流と継続時間は異なるが、充放電の電力量を同じにしているので軌跡は重なりループは閉じている。すなわち、1 サイクル終了後の充電深度は、常に SOC = 12% を維持することができる。また、グラフには開

Table 1 Specifications of lithium-ion battery for substation support equipment.

Items	Type	
	LIM60H	LIM3
Capacity / Ah	60	3
Nominal voltage / V	3.6	3.8
Operation voltage range / V/cell	2.75-4.15	2.75-4.1
Maximum charge current / A (rate)	600 (10 C)	3 (1 C)
Maximum discharge current / A (rate)	600 (10 C)	15 (5 C)

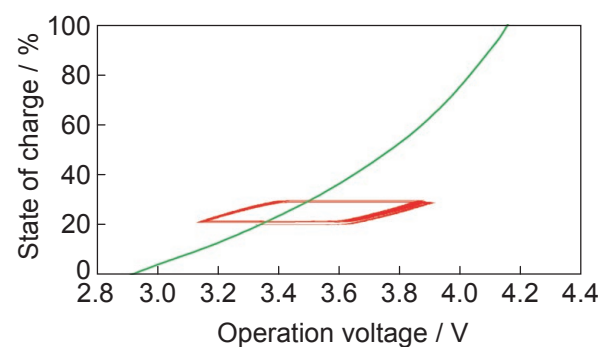


Fig. 6 Effect of voltage fluctuation by intermittent charge-discharge process on the state of charge for LIM60H type lithium-ion battery.

路端子電圧 - SOC 特性を付記した。Fig. 7は、Fig. 5に示すパルス電流による充放電パターンが崩れて、充電のみの繰返しが発生した場合を想定した試験結果である。連続充電により充電深度が上っていき、過電圧状態に達すると、定電圧制御領域になり、充電電流が垂下する特性となる。なお、この充電では上限電圧 4.1 V に達した後、定電流充電から定電圧充電に移行させる制御をおこなっている。また、逆に放電時も同様な定電圧制御をおこない、放電電流の垂下により過放電の保護を実現している。

6.2 直流変換回路

架線と電力貯蔵媒体間の電圧変換には二象限チョップパ回路（電流可逆チョップパ回路）¹⁾を採用した。その回路図を Fig. 8 に示す。このチョップパを採用することにより、充放電電流は断続することがなくリップル率を低くすることができる。Table 2 に直流変換回路の仕様を示す。

フィルタは誘導障害該当周波数 (30,60,120 Hz) を避け、共振周波数の目標を 12.5 Hz 付近とした。また、

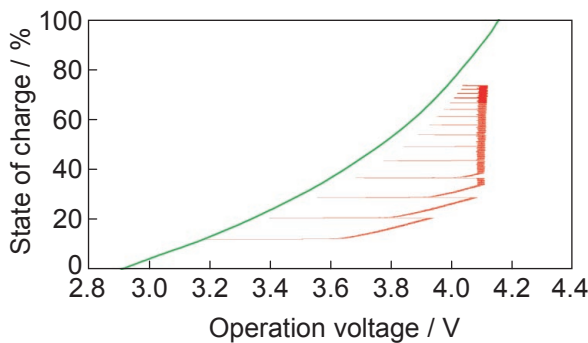


Fig. 7 Effect of voltage fluctuation by intermittently repeated charge process on the state of charge for LIM60H type lithium-ion battery.

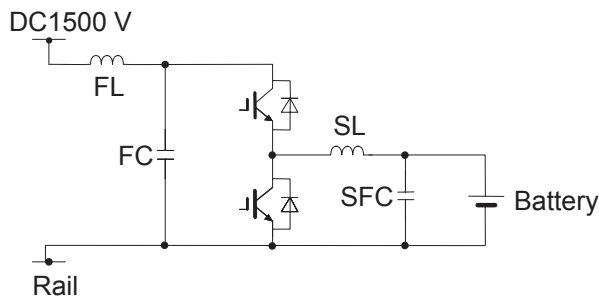


Fig. 8 Second-quadrant chopper circuit diagram for DC/DC converter.

スムージングリアクトルはリップル電流が定格 (600 A) の 5% (実効値) を目標に設計した。スイッチング周波数は低くした場合の SL, SFC の大形化、高くした場合には IGBT 熱責務が大きくなること等を総合的に検討して決定した。

6.3 充放電制御

リチウムイオン電池にとって、過充電、過放電は劣化の要因となるため避けなければならない。また、電気鉄道にとって架線電圧変動はき電回路の構成上、許される範囲がある。そこで、架線電圧変動の許される範囲を有効に活用して、リチウムイオン電池の経済設計をおこなった。この設計思想に基づき作成した主な制御関数を示す。

(1) 電流制御関数

- 最大充電電流 (ic-max)
- 最大放電電流 (id-max)
- 放電制御電圧 (d0, d1, d2)
- 充電制御電圧 (c0, c1, c2)
- 過充電制限電圧
- 過放電制限電圧
- 充電深度目標電圧
- 充電深度調整電流

(2) IGBT ゲート制御変換関数

(3) アプリケーション用関数

- 寒冷地用の電池保温制御
- 受電電力のピークカット制御

Fig. 9 に、上記項目 (1) の一部を模式図で示す。プロトタイプ電力補完装置のフィールド試験においては、スムージングリアクトルのリップル率 (設計値: 5%) を考慮して最大充放電電流値は ic-max = 570 A, id-max = 570 A に決めた。

Table 2 Specifications of second-quadrant chopper circuit for DC/DC converter.

Items	
Chopper circuit	
Main electronic device	IGBT
PWM frequency	700 Hz
Filter reactor (FL)	8 mH
Filter capacitor (PC)	20000 μF
Smoothing reactor (SL)	6 mH
Smoothing capacitor (SFC)	3500 μF
Battery	
Serial connection number	182
Nominal voltage	650 V
Rated capacity	60 Ah
Maximum charge and discharge current	± 600 A

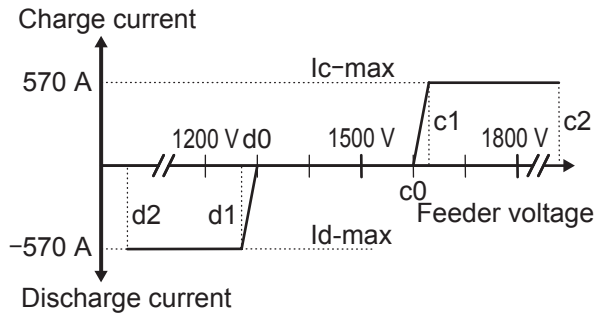


Fig. 9 Schematic diagram of charge and discharge control for substation support equipment.

7 電力補完装置のフィールド試験

Fig. 10 に、電力補完装置の運転特性を架線電圧と電流のチャートで示す。架線電圧上昇時に電力補完装置は回生電力を吸収し、架線電圧低下時には逆に電力補完装置からの電力供給により架線電圧降下を抑制している。また、このチャートの電圧を横軸として、電池の充放電電流の変化を Fig. 11 に示す。図は、制御関数により電力補完装置が動作していることを示している。また、電力補完装置の効果を検証するために、き電圧変動の度数分布図を作成し、それを Fig. 12 に示す。電圧シフトは架線電圧上昇の方が顕著に現れているが、これは、Fig. 5 に示したように充電を最大充電電流に設定し、放電は充電の 50% としたためである。

このフィールド試験に供している電力補完装置の容量は、フィールド試験線を走行する電車の回生電力と比較して約 1/6 であるため、架線の電圧上昇を完全に防止することはできない。そこで、フィールド試験データを活用して電力補完装置のシミュレーションモ

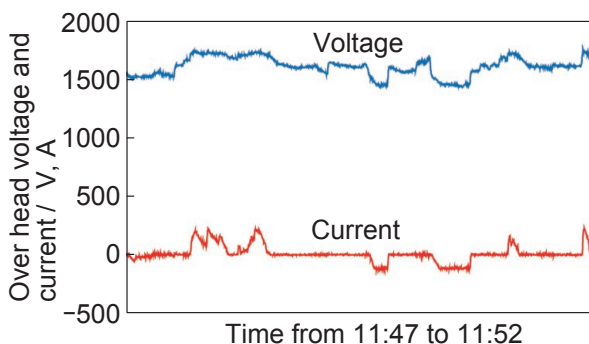


Fig. 10 Representative field test result of power compensator.

デルを作成し、シミュレーションにより電力補完装置の特性評価をおこなったので、その内容を次章に示す。

8 シミュレーションによるフルモデル化

試作した電力補完装置は、試験フィールドを運行する電車に対して容量が小さいため総合的な効果が見えにくい。そこで、電圧補償（放電）、回生吸収（充電）のそれぞれに適した制御関数を使用して、特性をモデル化するために必要な試験をおこなった。その測定データを用いて作成したシミュレーションモデルを 1 単位として、並列接続によりフルモデル化等のシミュレーションを実施した²⁾。

8.1 シミュレーションモデル

汎用回路解析プログラム EMTP による鉄道用電力補完装置を考慮したシミュレーションモデルを構築した。その回路を Fig. 13 に示す。き電回路は EMTP 内の電気回路部で作成し、電力補完装置は EMTP 内の制御回路を構成する TACS (Transient Analysis of

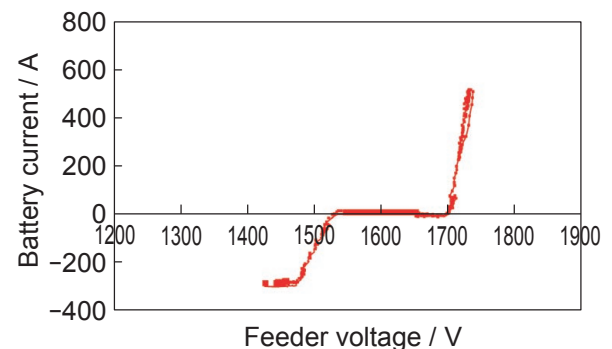


Fig. 11 Battery current as a function of feeder voltage for substation support equipment.

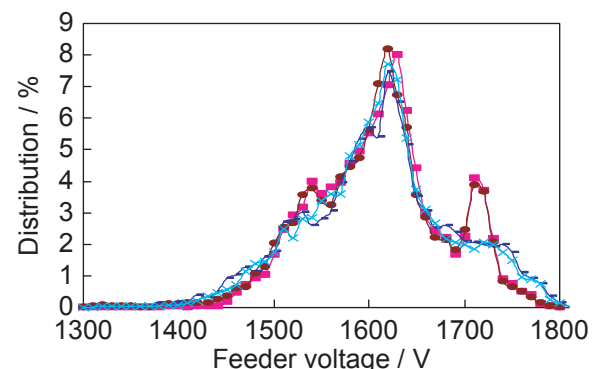


Fig. 12 Distribution of feeder voltage for substation support equipment.

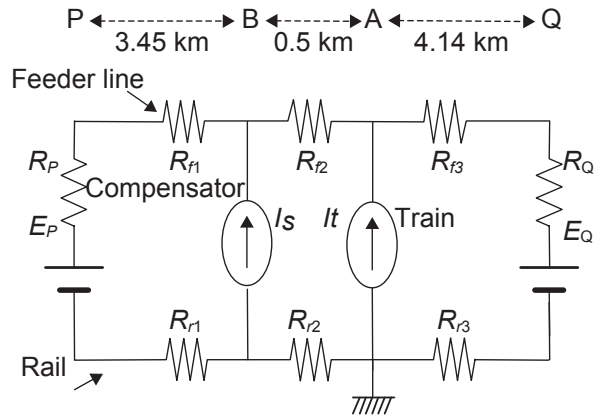


Fig. 13 Simplified electronic circuit diagram for simulation model of substation support equipment.

Control System)と電流源 I_s を用いて表現した。また、電車電流は列車運行パターンを考慮して設定した電流源 I_t で表現した。

Fig. 14 にプロトタイプの電力補完装置を運転あるいは停止している時の装置接続点における架線電圧実測およびシミュレーションの結果をあわせて示す。なお、実測値は2005年2月におこなった1/6プロトタイプ電力補完装置のフィールド試験時のものである。このシミュレーションは検証精度を高めるために、Fig. 13のモデルに複線部などを考慮した精密モデルを使用している。さらに、Fig. 13における変電所も、テブナン-ノトンの定理によりFig. 15に示すように内部抵抗 r と外部抵抗 R を分流則により電流源に変換して電気回路を構成している。その一方、電車電流を平均的な電流パターンも用いて表現したこと、PおよびQ変電所の外方に接続している変電所およびその区間で運行している電車の影響を無視しているため、測定データとシミュレーション波形には差異が生じるものと予想される。しかしながら、その結果は、Fig. 14に示すように、電力補完装置運転、停止を問わず、計算結果の波形は実測結果と概ね一致し、最大・最小電圧に対しては10%程度の誤差で表現可能となった。この誤差は、上述したように、隣接する電区間等の電力授受を省略した簡易モデルであること、かつ電車運行のばらつき等によるものであり、これらを考慮すると提案モデルは実機設計をおこなうに十分な精度を有すると考えられる。

一き電区間ではあるが、その電区間を精密にモデル化したシミュレーションモデル（電気回路、制御回路）により整合性を確認したので、今後のシミュレー

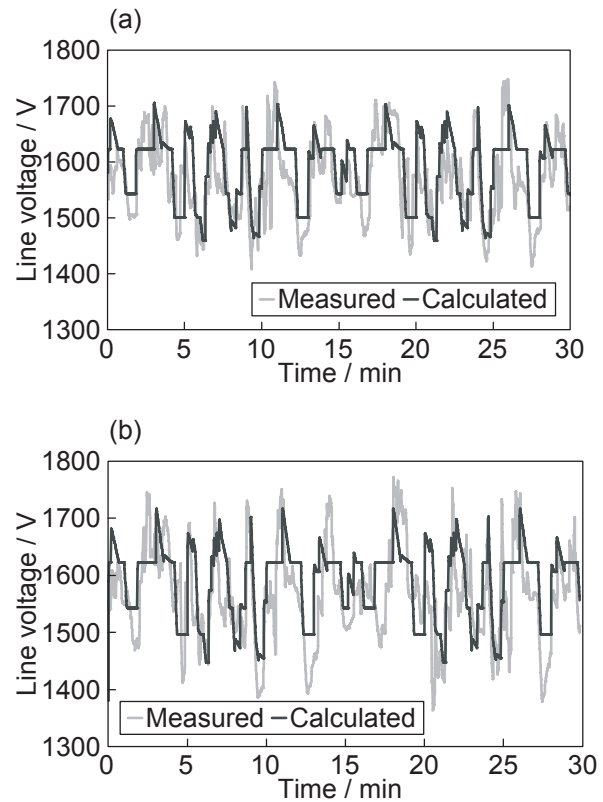


Fig. 14 Comparison of measured and calculated line voltage with prototype compensator (a) and without one (b).

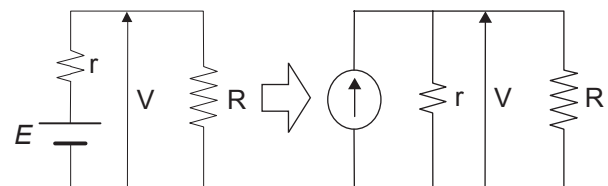


Fig. 15 Conversion method to current source for electronic circuit of substation.

ションは、Fig. 13に示した「き電系統（電気回路）を簡略化した単線モデル」を用いておこなった。

8.2 実機電力補完装置

フィールド試験で用いたプロトタイプ電力補完装置の容量が小であるため、回生電力の吸収ができない期間が存在した。そこで、十分な回生電力を吸収できる実機容量は、プロトタイプの何倍にすれば表現されるかを検討した³⁾。

電力補完装置の電池ユニット並列数 N は補完装置設置点の最大架線電圧 V_{Lmax} [V]、DC/DCコンバータ最大変換率 β_{max} 、装置設置点近傍を走行中の車両から生じる回生時の最大電流 I_{Tmax} [A]、回生時の貯蔵

媒体への最大充電電流 I_{Bmax} [A], 貯蔵媒体の定格電圧 V_m [V] で決定される. さらに, 貯蔵媒体となる二次電池の1セルあたりの電圧を V_S [V/cell], 直列数を x とすると (1) 式が成立するため, (2) 式の関係式が導かれる.

$$V_m = xV_S \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$I_{Tmax} \times \beta \max \approx N \times I_{Bmax}$$

$$\therefore N \approx \frac{V_{Lmax} I_{Tmax}}{xV_S I_{Bmax}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで, $N = 1$ となる場合には, 電池ユニットが1ユニットのみで, 回生時に生じる電力が吸収できることを表わす. (2) 式にフィールド試験の条件を適用させると, 少なくとも $N = 6$ となると, 回生電力を全て吸収することが可能となった. したがって, 本稿における理想的な電力補完装置は, プロトタイプの6倍の容量として取り扱うことにした.

8.3 シミュレーションによる経済的な容量の検討

シミュレーションモデルはフィールド試験中の電力補完装置を1ユニットとしてモデリングした. 試作した装置は6ユニットであり, その数に相当する並列接続方式である.

まず, シミュレーションに先立ち, き電回路の電圧変動に対する許容範囲について考えなければならない. 2章および3章において特徴と課題について述べたが, 電気鉄道にはその発達の歴史の中で, 相当の電圧降下が技術的にも許されてきた. しかし, き電電圧上昇に対しては, 回生失効対策等の困難な問題があり, 抵抗器等による回生電力吸収による架線電圧上昇を抑制する装置の設置がおこなわれてきた. しかし, 電気鉄道にとって, 架線電圧変動はき電回路の構成上, 許される範囲がある. そこで, その範囲を考慮して, 電力補完装置のシステム構成をシミュレーションにより検討した. 具体的には, Fig. 9の充放電制御の模式図に示した電力補完装置の電流制御関数 $id\text{-max}$, $ic\text{-max}$ を変えることにより, 架線電圧の変動幅をコントロールできる. Fig. 16は架線の電圧変動幅を1470~1730Vの範囲内で制御するために必要なユニット数と効果についてシミュレーションした結果である. この例では3ユニット構成がコストパフォーマンス的に最良であると考えられる.

8.4 シミュレーションによる充電深度制御方式の評価

Fig. 6においては, 充放電深度の均衡例を示したが,

電車の運行は朝, 夕方異なるのが一般的であり, 極端に充電深度が移行する現象が確認された. そのために, 待機状態において充電深度調整電流による制御をおこなった⁴⁾. この機能による効果を Fig. 17に示す. SOCが7%の状態において, 充電深度目標値を35~45%に設定して運転をおこなった結果, 試験終了時にはその値が35%となり, 制御が可能であった. しかしながら, この方法は, 回生電力による充電あるいは電圧補償による放電以外の電流を使用しているため, エネルギー効率の考えから最良とは言えなかった. そこで, Fig. 9に示す充放電制御の $id\text{-max}$ (最大

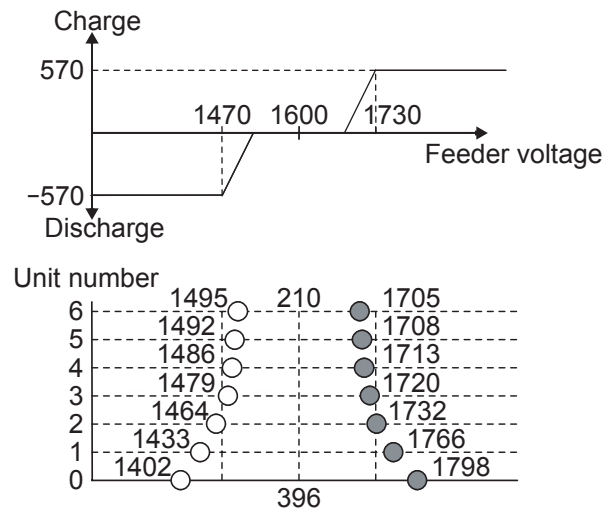


Fig. 16 Simulation results of the effect of battery unit number on the deviation of feeder voltage.

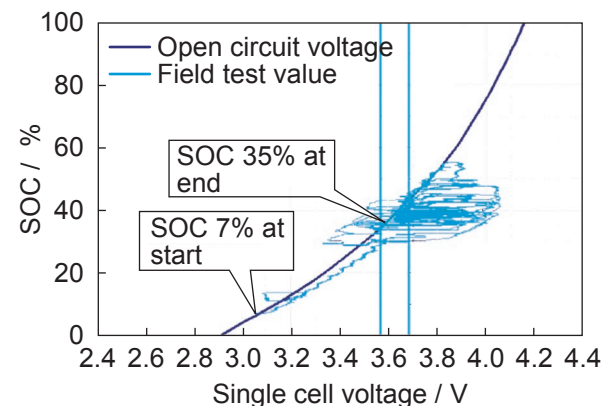


Fig. 17 Representative test result on the control of state of charge of battery by current adjustment during stoppage time at the station.

放電電流)あるいは i_{c-max} (最大充電電流)を制御することにより充電深度の目的値に維持する調整方法をシミュレーションにより検証した。その方法を前述した待機状態におけるものと合わせて、Fig. 18に示す。図には、回生吸収を主たる目的として電力補完装置を使用する場合に、従たる目的の電圧補償動作時の制御特性に充電深度調整目標の制御を上乗せする例(b)を示した。なお、電圧補償を主たる目的にする場合には、逆に充電時の特性に充電深度調整を負わせればよい。また、 I_{cd} を変化させる方法に換えて(V_1-V_2)または I_{cc} の代わりに(V_3-V_4)を変化させる方法もある。これらは、列車密度・編成数等の線区特徴により最適な方法を選択するべきであるが、この選択に対してシミュレーションは有効である。

8.5 シミュレーションによる電池劣化時の評価

電池の内部抵抗は、使用している間に上昇していくので、電池電圧にも影響をあたえる。このことは、

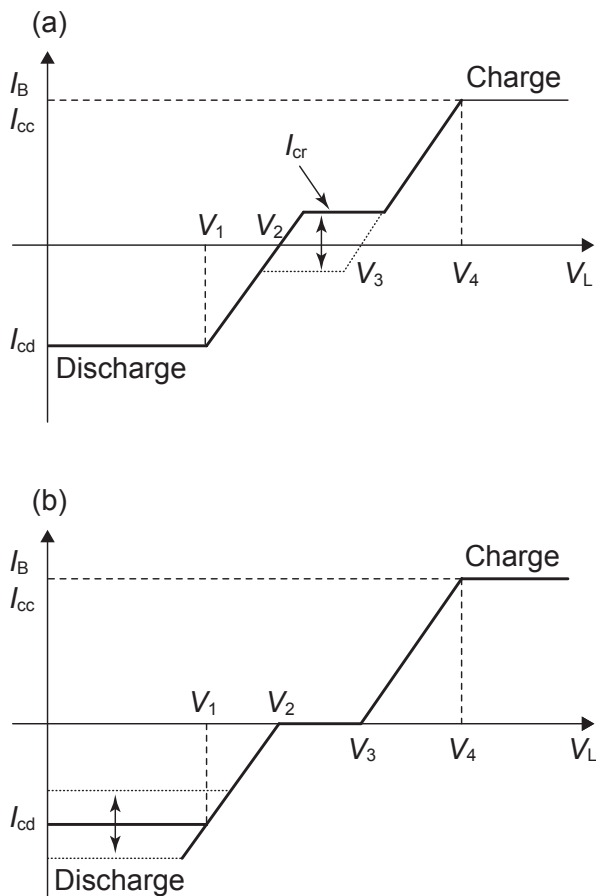


Fig. 18 Adjustment methods of I-V characteristics of DC/DC converter for controlling the state of charge of battery during train stoppage time (a) and power compensator operation (b).

Fig. 6で示した充電深度と電池電圧との関係において、横軸の電池電圧の変動幅が大きくなることと同じであるから、充電深度調整制御にも大きな影響をおよぼす。そのために、適切な充電深度のコントロール機能を直流変換装置に付加することにより、電力補完装置の性能低下を抑制することにした。その効果をシミュレーションによって検証した結果、電池の劣化により内部抵抗が1.5倍となっても装置の運転には影響のないことを明らかにできた^{5,6)}。

過充電時の定電圧制御の応答性の論理をFig. 19に示す。図において、 $K = 40$ (A/V)とすると、応答性の誤差は2.4%となるが、電圧変動 $\Delta V = 1/746$ (4.1 V/cell \times 182 cell)に対して $\Delta I = 40/600$ は、十分大きく確実に過充電を抑止できている。これは、内部抵抗が2倍以上に増加しても問題ないことを示している。ここで、内部抵抗が増加する予測理論について付記する。

リチウムイオン電池は充放電サイクルの繰返しによって放電容量が減少し、V-I特性の傾きから求めた直流抵抗が上昇する。この原因は、電池の負極上に生成する皮膜(SEI: Solid Electrolyte Interface)であるといわれている。SEIは、負極の卑な電位による電解液溶媒の還元重合生成物を主成分とする皮膜であり、その他の成分として、本来、充放電に関与すべきリチウムイオンを取り込んでいる。そのため、電池反応に関与できるリチウムイオンが減少し、放電容量が低下する。一方、SEIは電子伝導性をもたないため、電池の抵抗上昇をひきおこす原因であるとされている。つまり、放電容量の低下および抵抗の上昇ともにSEIの成長によって決まるという知見がある。この予測理論から、実際にFig. 5に示した充放電サイクル条件による寿命予測をおこなったところ、充電容量はサイク

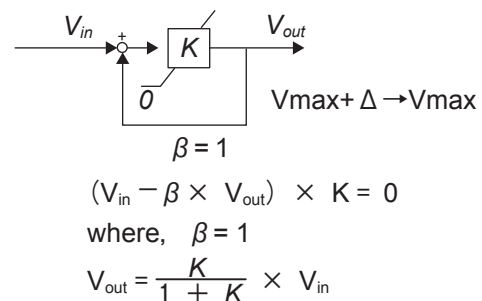


Fig. 19 Control method of constant voltage charge for battery under overcharge region.

ルの経過にもなって徐々に低下をはじめ、その傾向は周囲温度が高いほど顕著に現れていた。また、内部抵抗が1.5倍に増加するのは、設計条件に照らし合わせた場合、10年以上との予測を得ることができた。

9 リチウムイオン電池の特徴

リチウムイオン電池の温度特性として、低温状態における内部抵抗の増加がある。その代表例を Fig. 20 に示す。一方、高温状態においては電解液の劣化が予測され急激な容量減少をひきおこす可能性がある。日本には顕著な四季の特徴があり、リチウムイオン電池の特性に対して夏季対策、冬季対策が必要である。

(1) 冬季対策

冬季対策は、外気温が低下することにより電池の温度が低下し、内部抵抗が増大することに対する対策である。電池盤にヒーターを設置する一般的な方法もあるが、内部の温度を適切な状態に維持するためには電池自身の充放電による内部発熱方式が望ましい。そこで、複数の電力補完装置間で電力の授受をおこない、電池内部抵抗による発熱保温方式を考案した。Fig. 21 にその概念を示す。この方法はヒータ電源等の設備が不要である上に、熱効率が非常に高い。これは充放電試験の中で電池側面と電池内部の温度差が約7℃生じることを確認した結果からの推察である。

(2) 夏季対策

夏季対策は、外気温の上昇により発熱部の温度と外気温の差が少なくなり、熱放射・熱対流効率が低下する現象に対する対策である。単電池のユニット化に使用する接続バーの温度係数を電池の温度

係数より小さくし、さらに接続バーの表面積を多くすることにより熱放射係数を大きくする。このことにより電池の内部発熱を電池表面と電極を経由して接続バーから放熱する構造を考案した。これによって、熱時定数が小さくなり短時間繰返し通電による電池内部温度上昇を抑制することができる。その効果の代表例を Fig. 22 および Fig. 23 に示す。参考のために、Fig. 24 は、変圧器の実測温度データを基に作成した年間温度変化の概念図を示したものである。二本のグラフの間は一日の温度差を表している。このグラフより、夏季においては、外気温の上昇により発熱部の温度が上昇し、冷却効果が低い場合には、保護限度に達することが予測される。

リチウムイオン電池は急速充放電により電池の内部温度が上昇する。また、接続バーも短い600 A という大電流通電により発熱する。電池は構造上、冷却構造化するのは経済的でないため電池バーの冷却性能

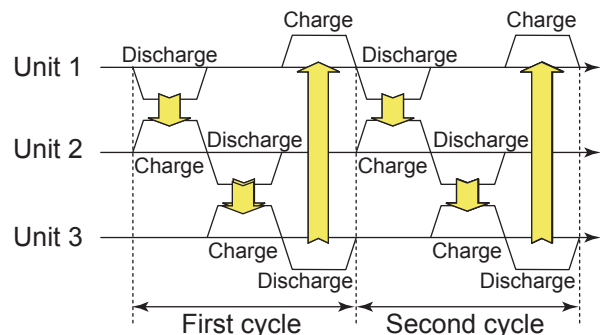


Fig. 21 A new method concept for thermal management by heat evolved from battery.

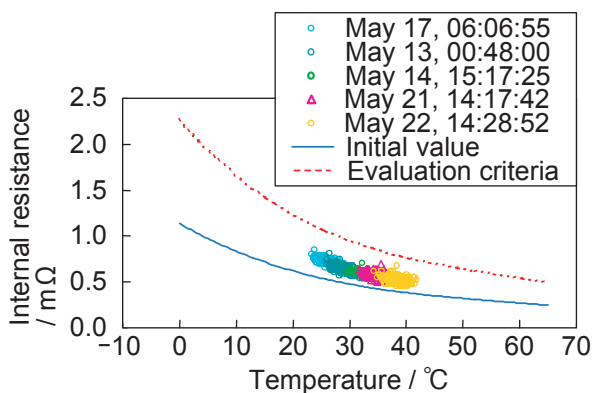


Fig. 20 Dependence of internal resistance on temperature for representative lithium-ion battery.

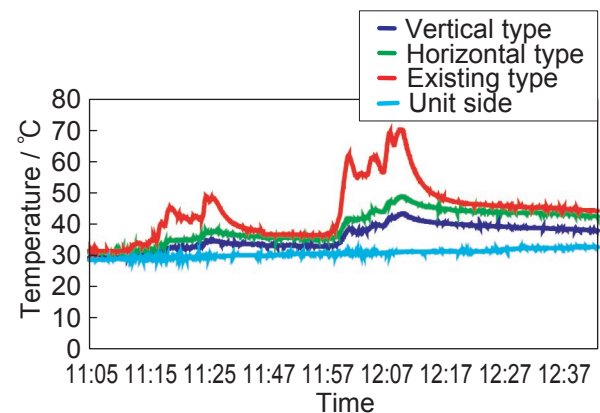


Fig. 22 A representative temperature change on connection bar of battery during charge.

を向上させることにした。まず、銅バーの発熱を抑制する（断面積を大きくする）。つぎに、体積を大きくする（熱容量増大による温度上昇係数を低減する）。そして、間欠負荷の特性を活用し、無負荷に早く冷却する（表面積を大きくして放熱時定数を短縮する）構造とした。設計条件として、電池本体より接続バーの温度上昇係数を小さくするようにした。このことにより、電池は表面だけでなく、電極部から接続バーを経由して放熱することが可能となる。言い換えれば、銅バーは電池の放熱器の役目をかねそなえることとなった。この放熱効果は Fig. 22 の従来（初期の銅バー）と縦形（銅バー改良と縦形フィン）の温度差として現れている。蓄電池盤の設置環境、盤内の換気構造により適切な構造の接続バーを設計し、蓄電池を高温状態に放置しないことが長寿命化の要件である。Fig. 25 は試作した銅バーの一部である。さらに、冷却時の時定数を短くする方法として送風による空冷の試験も実施した。その様子を Fig. 26 に示す。現フィールド試験の負荷率においては自然対流による効果が確認されたので、基本設計ではメンテナンス性を重視し、空冷

より放熱性の向上による自然対流を主とした設計にすべきと考える。しかしながら、先に述べたように、日本の年間の温度差は電池にとって無視できるほど小さくないのが現実である。外気温の高い地域における夏場の対策としては効果の高い方法であるといえる。

10 リチウムイオン電池の劣化診断技術

長期耐久フィールド試験状態にあるプロトタイプ of 電力貯蔵媒体は、リチウムイオン電池を 182 セル直列接続した組電池を使用している。電池容量は電極面積を大きくすることにより増加できるが、電圧は電極材により決まるので高電圧を得るためには、直列接続は不可欠な構造である。この直列接続された組電池の性

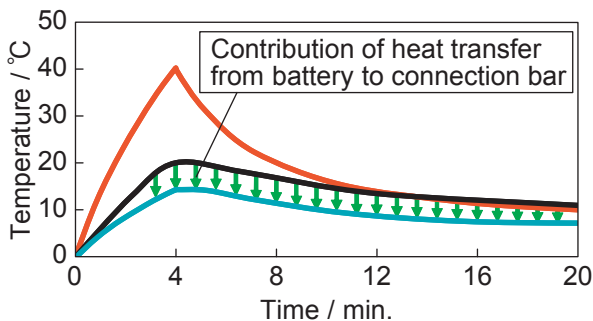


Fig. 23 Representative temperature change after 600 A charge followed by spontaneous cooling condition for battery and connection bar.
 — Battery, — Existing Cu bar, — New design Cu bar with fin

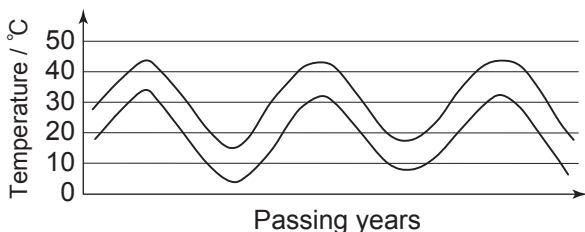


Fig. 24 Schematic pattern of annual temperature change in Wakasa region based on measured data obtained in transformer.

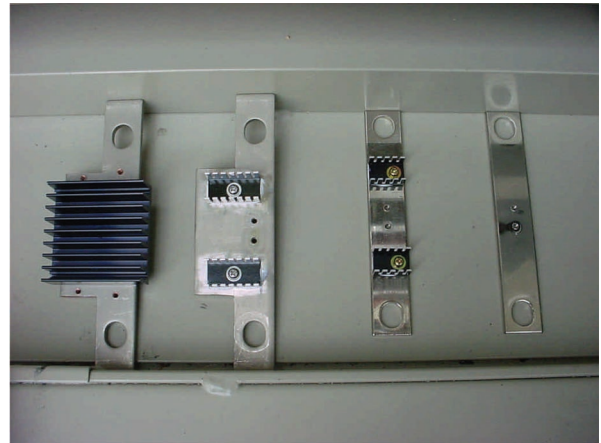


Fig.25 Various types of connection bar for test samples.

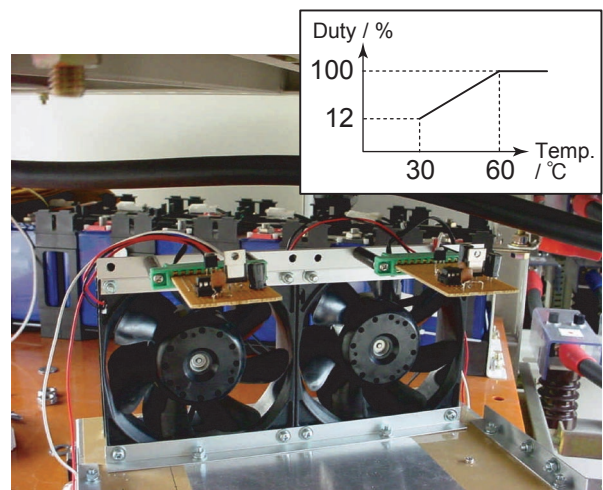


Fig. 26 Air cooling fan with PWM control for the test of connection Cu bar with fin.

能を持続的に維持するためには、各セルの状態を監視し予防保全の技術を確立しなければならない。そこで、長期耐久試験状態にあるリチウムイオン電池を対象に劣化診断技術の開発・検証をおこなった⁴⁾。

10.1 試作器によるアルゴリズムの検証

Fig. 27 に電力補完装置内の182セル直列接続したリチウムイオン電池I-V特性を示す。これは充電時間30 s、待機時間90 sの間欠充電をおこなった結果である。この図より内部抵抗 R_B を表すI-V特性の傾きは、おおむね一定でSOCに依存しないことが明らかである。よってリチウムイオン電池は簡易的にFig. 28 に示す等価回路で表現可能である。

$$R_B = \Delta V / (I \times N) \quad \dots \dots \dots (3)$$

- ここで V_0 : 開路電圧
- V : 電池端子電圧
- ΔV : 充電による電圧上昇値 = $V - V_0$
- I : 充電電流
- N : 直列セル数

電力補完装置の充電電流は最大600 A(10 C)であるためSOCが1%上昇するのにかかる時間は3.6 sである。また、SOC 1%上昇時の内部電圧変動はわずかで

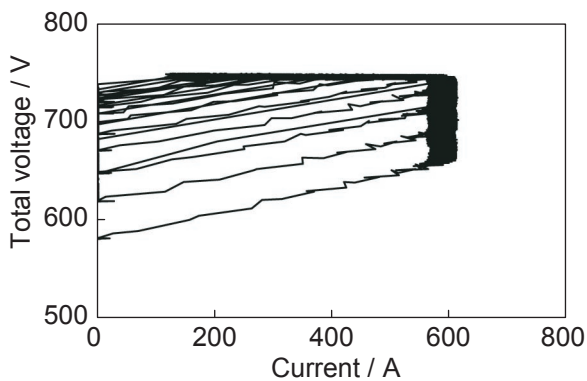


Fig. 27 V-I characteristics of battery assembly with 182 serial connections at different SOC for 30 sec. charge followed by 90 sec. rest.

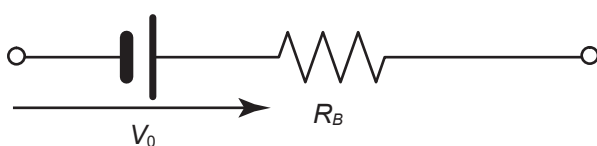


Fig. 28 Equivalent circuit for lithium-ion battery.

ある。以上のことから、電流が流れ始めた瞬間から適切な待機時間を設け、これをインターバルとする。このインターバル後の電圧変動 ΔV により、(1)式により内部抵抗を演算して表示する。

Fig. 29 に試作器の簡易試験状況を示す。この測定器は、電力補完装置が稼動している状態において計測することを前提としているので、従来の内部抵抗計のような電流発生回路等は含まず、A/D変換機能を有する安価なワンチップマイコンPIC、液晶表示ユニットとプログラムを書き込むためのモジュラージャックからなる極めて簡素な構成⁴⁾をとる。ここで試作した内部抵抗測定器は、可搬性、特性試験等を考慮して、電流検出には電池接続バーをシャント抵抗として代用し容易に作ることにした。その結果、試作二号機ではシャントと抵抗からの入力電圧をOPアンプにより10倍増幅して電流検出精度の向上をはかった⁵⁾。この簡易な試作器を複数作成して開路電圧検出のタイミング、開路電圧検出からの電圧変動 ΔV 検出までのインターバルと ΔV 検出精度について検討を加えた。Fig. 30 に試作機の内部抵抗算出フローチャートを示す。電力補完装置稼動中、試作器は常にリチウムイオン電池の電圧・電流を測定している。このとき、前述したように、電池に電流が流れ始めた瞬間から、インターバル後に再び電圧・電流を測定し、これより抵抗を算出する。ここで、電池電流には、しきい値を設け、これを超えたとき電流が流れたと定義している。これはノイズによる誤測定の防止と電流値が小的时候の抵抗導出をしないためである。とくに電流値が小的时候はシャント抵抗による電圧変動が小となるため、電流

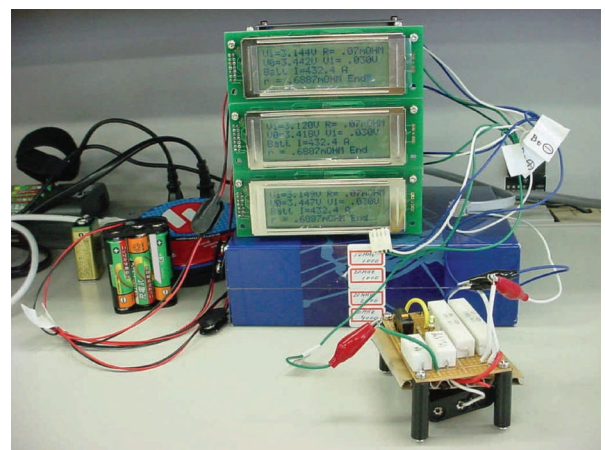


Fig. 29 Appearance of prototype algorithm experiment for measurement of internal resistance of battery.

測定誤差が大となる。また、電池の電圧変動も小となるため抵抗測定には不適當である。

10.2 全数状態監視装置への技術移転

電池内部抵抗は、電池の負極上に生成する電子導電性をもたない皮膜（SEI）が原因で上昇すると考えられていることから、内部抵抗の上昇現象はリチウムイオン電池の劣化診断の指標になり得るので、全セルの状態監視装置を設計した。

まず、試作内部抵抗測定器を電力補完装置フィールド試験段階のいくつかの電池セルに適用し、本装置が実用レベルであることを確認した。これを基に、全セルの状態監視装置をプロトタイプの鉄道用電力補完装置に装着して実用化のためのフィールド試験を実施中である。なお、抵抗測定のアigorithmは前節の抵抗計と同様であるが、データ処理は一時的な抵抗測定ではなく、トレンド監視に主眼をおいている。装置を装着したリチウムイオン電池は182セルの直列構造であるため、全ての単電池電圧は電池ユニット（7セル）単位に付属している監視基盤からデータ収集ソフトを搭載したパソコンに伝送し、電流検出は新たに専用の

CTを追加した。本装置も開発試験段階であり、フィールドデータの比較評価により安定運用を目指したソフト改良を進める。とくに、リチウムイオン電池の内部抵抗は電池温度に大きく依存するため、電池温度と内部抵抗の関係から管理基準を定める必要がある。この管理基準は電池内部と電池表面の温度差等の基礎データを蓄積して作成する予定である。

全数監視装置は、電流検出の安定化（ノイズ除去）を図るためハードウェアのフィルタ回路を追加した。このため電流検出と電圧検出との同時性を実現するのが困難となったが、電流検出をトリガとしてトリガ前の電圧値から演算をおこなえるように工夫している。表示部は横軸にセル番号（1～182）を表示し、縦軸に電圧、温度、内部抵抗をグラフ画面で表示する。演算に関するソフト上の定数は設定変更ウインドウにより容易に変更できる構造とすることにより、電力補完装置の運転モードに適した監視状態を選択できる構成にした。

11 全数監視装置による測定例

全数監視装置の表示例を Fig. 31 に示す。182セルの内部抵抗を全て表示すると共に、各セルの温度状態も同時に計測している。135セル付近の温度が低いのは、PWM制御のファンにより電池側面を冷却しているためである（9章）。さらに、Fig. 31 に示す内部抵抗を算出した充電状況を Fig. 32 に示す。この画面は、全数監視装置のトレンド表示部である。Fig. 31 の上段の総内部抵抗は、Fig. 32 に示す182セルの内部抵

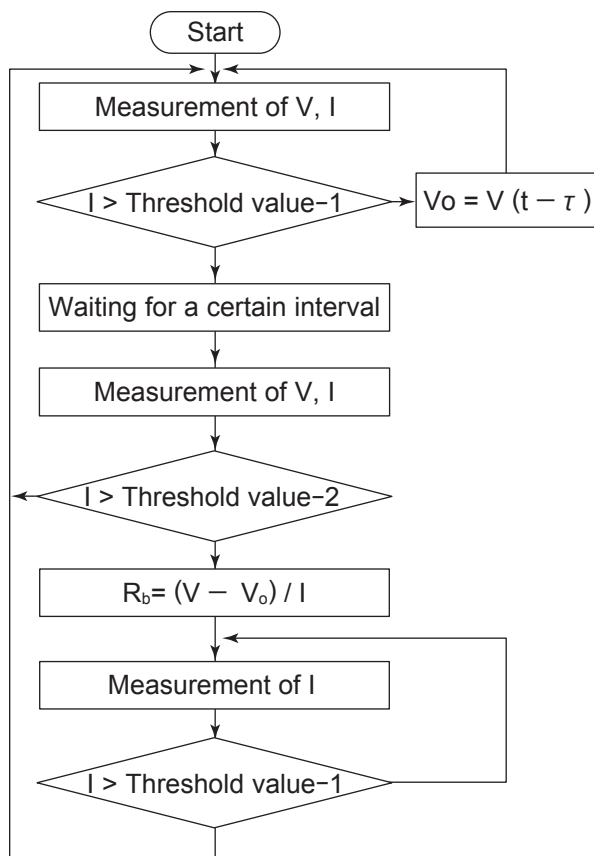


Fig. 30 Flowchart for measurement of internal resistance of battery.

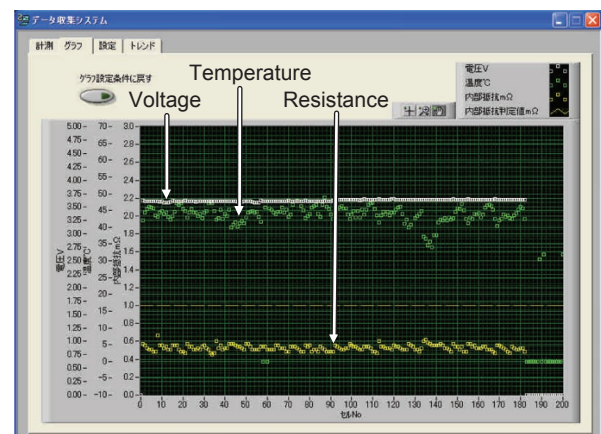


Fig. 31 An output window of newly developed monitor apparatus capable for detecting all the status conditions of composed batteries.

抗の合計値である。中段の総電圧から充放電状態と充電深度を解析することができる。下段は充放電電流を示し、上段の総内部抵抗の変化時の電流変化から内部抵抗を算出している状態が判別できるように配置した。参考のために、鉄道用電力補完装置を Fig. 33 に示す。この装置は、現在、二次フィールド試験（長期耐久試験）状態である。

12 まとめ

初期試験として新形電車に限定される学研都市線の松井山手駅構内では充放電の基本機能を直接運転（常時運転状態を監視）により確認（一次フィールド試験）した。また、この試験データを使用してシミュレーションモデルを作成し、適切な容量や、フルモデルの必要性と適切なユニット数について研究した結果、電

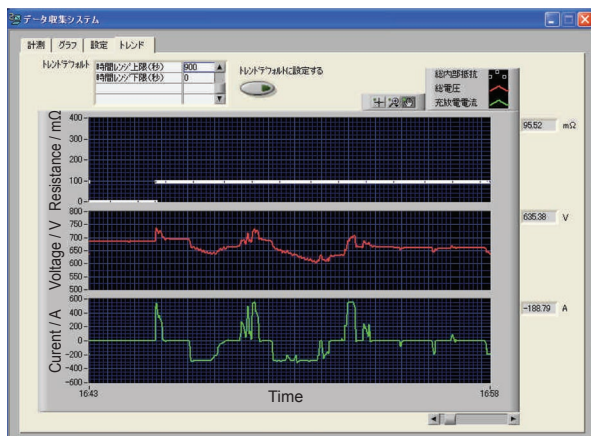


Fig. 32 A trend display window for battery.



Fig. 33 External appearance of field test for power compensator.

車容量の半分程度で十分効果ができるとの知見を得ることができた。その後、試験フィールドを、貨物列車が運行する東海道本線に移設し、約1年に亘り実系統に接続して回生電力吸収及び電圧補償用に充放電を繰り返した。その結果、内部抵抗の増加もほとんど発生せず、安定した状態を持続している。今後も運転を継続して暦年による影響を追跡したいと考えている。

電力補完装置の開発は途についた状態であるとの認識に基づき創造の過程について多く紙面を割いた。したがって、部分的にその根拠をわかりやすく解説している箇所が技術レベル的にアンバランスとなっている点についてはご容赦願いたい。

文 献

- 1) S.Umeda, J.Ishii, N. Nagaoka, H.Oue, N.Mori, and A.Ametani, "Energy Storage System Using Lithium-Ion Battery", *The 2005 Inter. Power Electronics Conf.*, p.455-460 (2005)(新潟).
- 2) N.Nagaoka, H.Oue, M.Sadakiyo, N. Mori, A. Ametani, S.Umeda, and J.Ishii, "Power Compensator Using Lithium-Ion Battery for DC railway and Its Simulation by EMTP", *63rd IEEE Vehicular Technology Conference*, 6P-9 (2006)(オーストラリア).
- 3) S.Umeda, J. Ishii, H.Oue, N.Nagaoka, "An Estimation of Lithium-Ion battery's Capacity Installed in Power Compensator for DC Railway", SPC-06-96/IEA-06-19 半導体電力変換/産業電力電気応用合同研究会(2006)(山口).
- 4) S.Umeda, Y. Nakamura, J. Ishii, M Sadakiyo, N. Nagaoka, "Monitoring Equipment of Lithium-Ion Battery in Power Compensator for DC Railway", TER-06069/LD-06-47 交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会(2006)(北海道).
- 5) N.Nagaoka, M.Sadakiyo, N.Mori, A.Ametani, S.Umeda, and J.Ishii, "Effective Control Method of Power Compensator with Lithium-Ion Battery for DC Railway System" *upec2006*(英国).
- 6) S.Umeda, J. Ishii, and N. Nagaoka, "Effective Capacity of Lithium-Ion Battery Installed into Power Compensator for DC Railway" 電力エネルギー部門大会(2006)(沖縄).