S1-1-1.

車載高性能電池による架線ハイブリッド回生失効防止制御の定置試験結果

[電]○小 笠 正 道, [電]田 口 義 晃 ((財)鉄道総合技術研究所)

[電] 上 園 恵 一, [電]丸 山 真 範 (東洋電機製造㈱)

Plant test results of trolley & battery hybrid power control to suppress the regeneration cancellation

Masamichi Ogasa, Yoshiaki Taguchi, Member (Railway Technical Research Institute)
Keiichi Uezono, Masanori Maruyama, Member (Toyo Denki Co'ltd.)

The regenerative brake system has been contributing to reduced energy consumption on electric railway vehicles for over than 30 years. However, there are a lot of problems associated with the system, such as regeneration being cancelled out by wheel slide and trolley voltage conditions, decreases in electric braking force in the higher speed ranges, and restrictions on regenerative power determined by power supply circuit impedance. In order to utilize and recycle braking energy and secure a steady regenerative load, we selected lithium ion batteries to store electric energy and developed a rechargeable lithium ion battery (600V system) for use on electric railway vehicles.

In this paper, we report on the plant test results of trolley and battery hybrid power control to suppress the regeneration cancellation. Instead being cancelled out as is usual the case with the normal inverter fed e.m.u.s in times of trolley power supply stop, regenerative brake with the hybrid control under developed has demonstrated excellent performance of the high regenerative power continue till the zero speed, with the rechargeable lithium ion battery. This is the first report on the actual sized plant test of the trolley and lithium ion battery hybrid regenerative brake control.

キーワード：回生ブレーキ、省エネルギー、蓄電、リチウムイオン二次電池、ハイブリッド制御
Keywords: regenerative brake, energy saving, energy storage, rechargeable lithium ion battery, hybrid control

1．はじめに

電車の回生ブレーキは、近傍にエネルギーを消費する他の電気車が在線することが前提であり、稠密線区以外や早朝深夜では回生ブレーキが指令どおりに動作できない回生失効や回生絞込が発生する。この回生絞込を低減し、回生エネルギーを有効に利用するため、架線へ返せない電気エネルギーを車上の蓄電装置に蓄積する“架線ハイブリッド電車”の技術開発を行った。

背景には、近年蓄電媒体が急速な進歩を遂げつつあり、フライホイール、電気二重層キャパシタ、急速充放電可能な高性能二次電池（ニッケル水素蓄電池やリチウムイオン二次電池など）といった蓄電媒体を適用することで、鉄道車両にも搭載使用できる可能性が出てきたことがある。2003 年にはディーゼルハイブリッド車両 NE トレインや架線レスバッテリートラムがリチウムイオン二次電池を搭載して登場し、実験を進めている。

本ペーパーでは、高性能バッテリーの一種であるリチウムイオン二次電池を車載して、架線下を走る電車の回生失効や回生絞込の低減に向けた、実機レベル定置試験の実施結果を紹介する。

特に、回生動作中の架線遮断により完全離線状態となった場合においても、架線へ返せなくなったエネルギーをリチウムイオン二次電池に蓄えながら、何事もなかったかのように速度ゼロまでの回生ブレーキが動作する様子を実データにより示す。

2．架線ハイブリッド主回路構成

〈2.1〉主回路構成例

架線と蓄電媒体の回路上の配置や制御則との組合せは種々のパターンが考えられるが、最も容易に想起できる形態の１つとして、パンタグラフなどの集電装置によって授受する電気エネルギーを車両内で駆動用と蓄電用（架線へ返らないときに回生蓄電する）に並列接続して分配する方式が考えられる（図 1)。

この方式では、蓄電媒体前段の電力変換器で架線電圧と蓄電媒体電圧の電圧変換および余剰パワー相当分の電流制御を行うことが必要である。

〈2.2〉エンジンハイブリッド車両との主回路・制御の違い

一般的なエンジンハイブリッド車両における蓄電と架線ハイブリッド蓄電との違いは以下のようになる。

① エンジンハイブリッドで必要であった、直流母線までの間のエンジン → 同期発電機 → 整流器（PWMコンバータなど）が不要であり、回路構成はシンプルである。

② 回生制動時には、エンジンハイブリッドでのエネルギー回生先は蓄電媒体のみであるが、架線ハイブリッドでは、回生先が架線と蓄電媒体の２箇所となる。いわゆる“2（または多）電源回生回路”となる。交流車両では、PWM コンバータま

で共通（単相か3相の違い）のため、"エンジン＋同期発電機"を"架線＋変圧器"と置換えたと考えることが可能である。

③ シリーズハイブリッド方式のディーゼルエンジンの場合、回生動作中に蓄電媒体が容量一杯となってそれ以上回生エネルギーを蓄積できない（連続下り勾配時の抑速）場合、直流母線に接続されるPWMコンバータ等の整流器を逆動作（パワーの流れを逆転させる）ことで、エンジン排気ブレーキを使用することも可能となる。これは、架線ハイブリッド電車が蓄電媒体優先として回生した場合、それ以上吸収できない回生エネルギーを架線側へ返すことと制御上は等価である。つまり、車両のブレーキは、電車の場合には、回生蓄電ブレーキ＋回生架線返還ブレーキ＋摩擦ブレーキに、シリーズディーゼルハイブリッド車の場合には、回生蓄電ブレーキ＋回生排気ブレーキ＋摩擦ブレーキの3種類の組合せ協調制御が可能となる。つまり、②項の"2（または多）多電源回生"制御が基本である。このような構成とすることで、回生ブレーキの回生先の冗長化が図られ、さらに摩擦ブレーキの使用を抑えることが可能となる。

〈2.3〉き電系地上側設置蓄電システムとの主回路・制御の違い

直流き電系統で地上側に蓄電装置を搭載することも試みられている。通常は電圧制御のみで、電流制御は保護を考慮した蓄電パワー絞込みに用いるのが妥当である。きめ細かい制御を行うには電流制御が必要であるが、その場合には蓄電装置設置地点における電力潮流の方向を判断した上で、車両側との動作協調を行うために、車上と地上の通信が必要となる場合がある。

〈2.4〉車載蓄電媒体

蓄電媒体も種々考えられ、基本的な制御の考え方は同じであるが、詳細に実現するためには、媒体の特性に応じた制御則を適用することが重要である。例えば、ほぼ電圧源と見なせる蓄電池を使用する場合と、電荷量（つまり蓄電エネルギー量）が出力電圧と比例関係にある電気二重層キャパシタを使用する場合とでは、自ずから電力変換器に要求される電圧制御レンジが異なってくる。フライホイール形回転式蓄電装置の場合には可変電圧可変周波数動作が必要で、開放電圧とエネルギーの関係が線形でない。また、電流値に応じて対応可能なスッチング周波数等も決まってくるため、許容電圧電流リプルの検討も重要である。

鉄道車両における速度100km/h程度からの回生ブレーキエネルギーの半分を持たせる場合には、システム質量1トン程度で電動車1両当り10MJ以上のエネルギー量が必要となる。このようなエネルギー量に対応でき、大電流通電時の直流内部抵抗が小さく、電圧変動範囲が小さいために電力変換器動作が容易となるリチウムイオン二次電池（図2：公称電圧 604.8V、充放電可能電流 500A、蓄積可能エネルギー量 118MJ）を蓄電供試体とした。

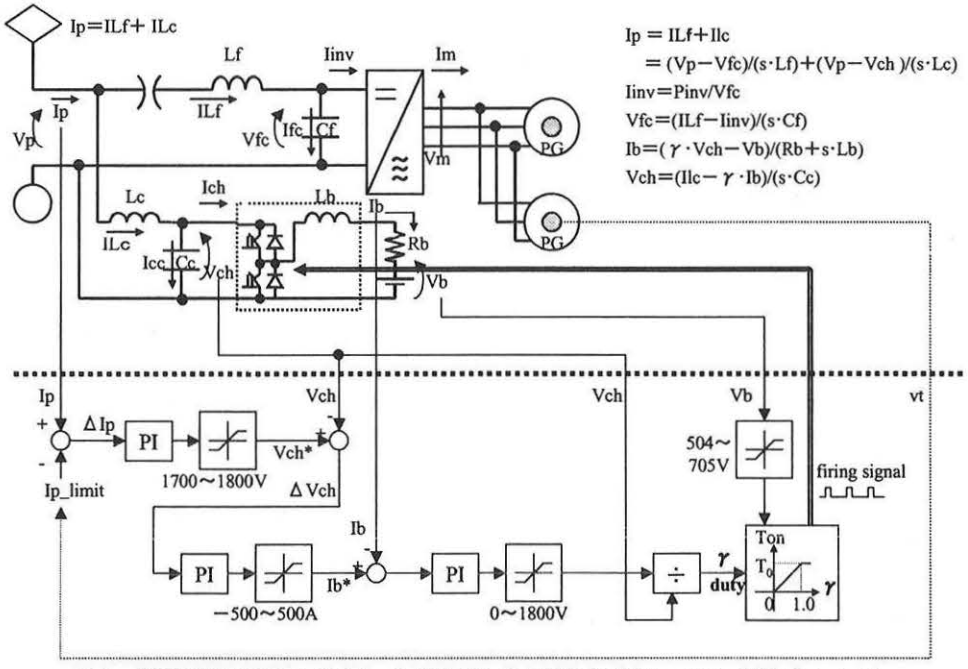
3．架線ハイブリッドパワーフロー制御のアルゴリズム

〈3.1〉回生時、力行時の制御の考え方

(1) 回生時、力行時

駆動用インバータにおける回生絞込動作をやめ、電圧に関して回生発電ブレンディングチョッパと同様の動作をさせる。これにより、従来発電抵抗で消費されていた架線へ返還できない回生エネルギーを蓄電媒体に蓄積することが可能となる。駆動用インバータのIV特性として設定されている回生絞込開始電圧を変更できない場合には、それよりも低めの電圧を昇降圧チョッパ装置に設定することで、架線へ返せる余裕代を残しながら蓄電装置にも回生することが可能である。

図1の制御方法では、架線電流リミット値（Ip_limit）として、一定値または速度等に応じたパターンを持たせておくことで、架線に優先的に返す（架線完全優先制御）か、蓄電装置に優先的に返す（蓄電完全優先制御）か、あるいはその中間的な架線電流を規定（架線電流規定）することが可能となる。チョッパ装置動作に際して架線電流リミッタを与えることで架線と蓄電装置のパワー分担を無段階に任意に設定することが可能となる。



Ip ＝ ILf＋Ilc
＝ (Vp−Vfc)/(s·Lf)＋(Vp−Vch)/(s·Lc)
Iinv＝Pinv/Vfc
Vfc＝(ILf−Iinv)/(s·Cf)
Ib＝(γ ·Vch−Vb)/(Rb＋s·Lb)
Vch＝(Ilc− γ ·Ib)/(s·Cc)

図1　並列接続型の架線ハイブリッド蓄電回路（主回路およびパワーフロー制御ブロック図）

架線電流リミッタの与え方は以下のようになる。

【回生時】
- 架線完全優先：
  Ip_min＝−∞
- 架線電流の大きさ規定：
  Ip_min＝−220A／軸等
- 蓄電完全優先：
  Ip_min＝0

【力行時】
- 架線完全優先：
  Ip_max＝＋∞
- 架線電流の大きさ規定：
  Ip_max＝＋220A／軸等
- 蓄電完全優先：
  Ip_max＝0

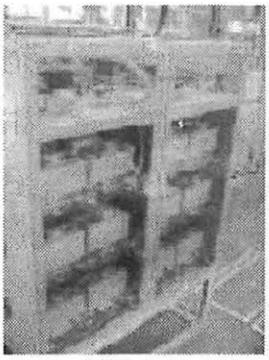


図2　車載リチウムイオン二次電池システム

なお、制御可能なのは昇降圧チョッパ装置の通流率のみであり、制約範囲内で通流率指令を生成することとなる。

留意点として、力行時にバッテリーから架線への流出が、回生時に架線からバッテリーへの流入が起らないようにする必要がある（図3）。

回路で対処するには、力行時には架線電流 Ip が流れる部分に Ip の正の向きの極性に導通するように、回生時には Ip の負の向きに導通するようにダイオードを設置する方法が考えられる。しかしこの方法では、力行、回生の度に回路切替えを要することとなる。また双方向導通形素子を挿入して力行、回生に合わせて電流導通方向を制御する方法も考えられるが、いずれも素子による電圧降下と電力損失が発生する。

これを制御のみで行うためには、パワーまたは電流の極性による動作可能範囲内で昇降圧チョッパを動作させれば良い。図1または図3の電流方向を正とすれば、対象とする負荷用電力変換器（インバータ等）と蓄電用電力変換器（昇降圧チョッパ等）のパワー総和または電流総和（ILf+ILc）が、力行時にはゼロ以上または正に、回生時にはゼロ以下または負となるよう、蓄電用電力変換器の電流制御を行う。

これにより、回路中にダイオードを設置しなくても、架線とバッテリーの間の不要な流込みを防止することが可能となる。つまり、図1または図3の回路（SIV 補機が無い場合）では、架線電流 Ip の極性を検出して、

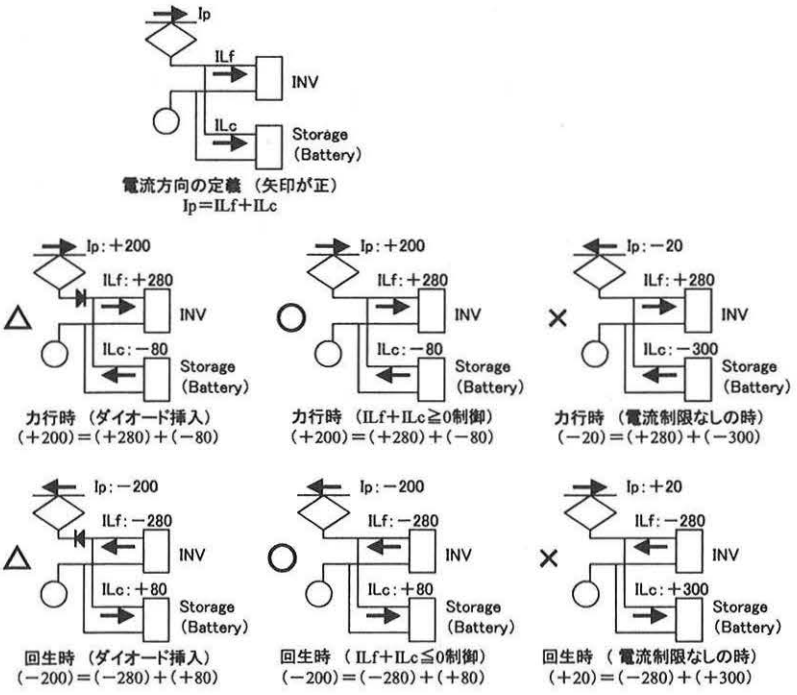


図3　力行時のバッテリーから架線への流出および回生時の架線からバッテリーへの流入の防止策

・力行時の蓄電媒体から架線への流出防止条件：Ip≧0

・回生時の架線から蓄電媒体への流入防止条件：Ip≦0

を満たすよう通流率リミッタをかければ良い。

電流 Ip に代えて、電流 ILf と電流 ILc を各々検出し、その総和（ILf ＋ILc）を極性判断基準に用いても良く、SIV 負荷電流の影響を受けないようにするにはこの方法が有効である。

さらに、回生時は SIV も負荷として繊込むが、力行時は SIV を負荷から除いて制御するといった手法も可能である。

〈3.2〉惰行時、停車時の制御の考え方

蓄電媒体のエネルギー残量を基準値範囲内に収める制御を行う。今回のリチウムイオン二次電池では、SOC（State of Charge：充電残量）として、45～55％範囲内を目標とする。

1CA～3CA の低レートにより、目標範囲へ向けて充電または放電する。放電時には、補機と架線へ電力を返還（SIV 電流に無関係にバッテリー電流優先制御）し、充電時は架線からバッテリー電流指令に基き供給する。

バッテリー電流制御 PI コントローラのリミッタを±500A⇒±50～±150A の任意の値に設定しておくことで、設定電流値での充電（SOC が基準範囲以下の場合）または放電（SOC が基準範囲以上）が行われ、力行、回生いずれにも対応可能な媒体エネルギー残量が維持される。この実現のため架線とのやりとりをフリーにする必要性があり、力行や回生時に必要であった、Ip または（ILf+ILc）の値による電流制御リミッタを外して制御する。

なお、無架線区間を走行する場合には、蓄電完全優先制御となり、惰行および停車中は充電のみのため放電モードをなくすことで対応可能である。

4．試験に使用した機器仕様

試験に用いた主要機器の諸元を表1に示す。

昇降圧チョッパは3相ブリッジ回路で構成し、位相差 120° の PWM チョッパ動作とした。この構成とすることで、直流生成時には蓄電媒体として二次電池、電気二重層キャパシタが使用でき、3相 VVVF インバータ動作として交流生成すれば、蓄電媒体にフライホイールなどの電動機を用いることも可能となる。

5．試験結果

実機インバータを用いて、昇降圧チョッパ装置およびリチウムイオン二次電池を接続し、定置での架線ハイブリッド試験を実施した。設定した最大パンタ点電圧を上回るパワー相当の電気エネルギーをバッテリーから放出または回収する試験を行なった。

力行中または回生中に架線電圧 1500V 供給用遮断器を遮断（離線と等価）後、数秒たってから再度遮断器を投入（着線と等価）して挙動確認を行った。

図4は、一例として最も厳しい条件である、回生時に架線完全遮断（完全離線発生）したと

きの停止までの挙動を示す。通常の電車であれば回生失効になる条件であるが、遮断器を遮断直後に、遅れなくチョッパ装置の電流制御系が追随し、パンタ点電圧上昇を抑えつつ、架線へ返還できなくなったインバータからの回生パワーをバッテリーに蓄積することができた。完全離線（遮断器遮断）になっても、インバータはノッチ指令どおりの回生トルクを発生し、離線前後での減速度変化はわずかであり、何事もなかったかのように減速停止（電気停止ブレーキ）することができた。

これにより、架線ハイブリッド制御の基本動作を確認した。

6．今後の応用

在来線電車では、線区や車両の実態に応じた平均的な回生絞込エネルギー量を蓄積する容量のバッテリーを車載するのが有効である。このときに、回生絞込の低減、消費電力量の低減、ペイするまでの期間最短化など効果が最も大きくなる。そのためにも、架線と、バッテリーをはじめとする車載蓄電装置とのハイブリッド技術の開発は重要である。

表1　試験構成主要機器の諸元

○インバータ	
回路方式：	電圧形3レベルIGBTブリッジ回路
制御方式：	非同期PWMインバータ動作
寸法：	W2,760×D2,600mm×H795mm
質量：	1,745kg（本体）（4回路VVVF＋1回路SIV）
定格入力：	直流1,500V
定格出力：	3相1,100V－250A－440kVA，－7～190Hz ×4回路（VVVF）＋1回路（SIV）
搬送波周波数：	1,500Hz（基本波0～50Hz），50Hz～（1パルス）
制御周期：	1msec（電流制御167μsec、応答10msec）
入力インダクタンスLf：	23mH／VVVF1回路
フィルタ静電容量Cf：	1350μF／VVVF1回路（2700μF-450V－4S2P）
○主電動機	
方式：	3相かご形4極誘導電動機
寸法：	φ540mm×635mm
質量：	595kg
定格：	3相1,100V－142A－220kW（1時間）－100Hz
回転数：	2,940rpm（定格），5,830rpm（最高使用）
歯車比：	98/15＝6.53
設定車輪径：	820mm
軸質量（負荷）：	39.9ton／軸（M車14.25ton／軸＋T車遅込）
速度センサ：	無電源60ppr
○昇降圧チョッパ装置	
回路方式：	電圧形2レベルIGBT3相ブリッジ回路
制御方式：	位相差120°PWM昇降圧チョッパ動作 （二次電池、キャパシタ等に適用）
	非同期PWMインバータ動作 （フライホイール等電動機に適用）
寸法：	W2,130mm×D1,398mm×H750mm
質量：	618kg（本体）
定格入力：	直流1,500V（750～1,900V）－300A－450kVA
定格出力：	直流600V（500～750V）－250A（最大500A）
搬送波周波数：	700Hz×3＝2,100Hz
制御周期：	250μsec（電流制御）
入力インダクタンスLc：	4.0mH
フィルタ静電容量Cc：	9,800μF
出力インダクタンスLb：	5.3mH（×3並列：U･V･W各相）
○エネルギー蓄積媒体	
方式：	リチウムイオン二次電池
寸法：	W960mm×D900mm×H1,100mm／台　×2台
質量：	605kg（セル総和），1,160kg（架台含む）
定格電圧：	604.8V（使用範囲504.0～705.6V）
充放電可能電流：	500A
定格容量：	55Ah（エネルギー33kWh）
セル公称電圧：	3.6V（使用範囲3.0～4.2V）
構成：	7直列／モジュール×24直列（168セル） 電圧監視、バランサおよび各種保護装置付き
正極材料：	$LiMn_2O_4$（マンガン酸リチウム）
負極材料：	C（カーボン）
電解液：	プロピレンカーボネイト＋$LiPF_6$塩
セパレータ：	プロピレン多孔膜
サイクル寿命：	100,000回以上（DOD＝10%）
標準内部抵抗値Rb：	0.1Ω

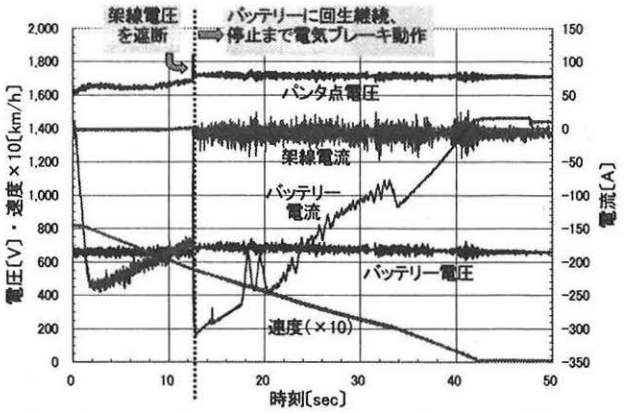


図4　回生ブレーキ中の架線遮断（完全離線）による挙動

この架線ハイブリッド技術の使用によって、都市近郊線では1電動車当り300～600kW級バッテリー搭載による省エネ化が、トラム級車両では300kW級バッテリー搭載による架線レス化（途中駅での急速充電による走行距離延伸も含む）の可能性が見込める。また一部非電化区間への乗入走行では、架線下では都市近郊線区に準じた走行を、末端非電化区間数km程度はバッテリーによる架線レス走行とする可能性も出てくる。

7．まとめ

本論文における結論は以下のとおりである。

(1) 架線とバッテリーのハイブリッド制御を提案した。エンジンハイブリッドのような回生先が1箇所の場合と異なって2（多）電源回生となる場合に、力行時のバッテリーから架線への流出や、回生時の架線からバッテリーへの流入を制御のみで抑制できるよう、負荷電力変換器と蓄電電力変換器の入力電流総和にリミッタをかける方法を考案した。

(2) 昇降圧チョッパ装置と600Vリチウムイオンバッテリー、実機インバータを組合せ、定置試験を実施した。

(3) 力行中や回生中に架線遮断（離線状態発生）を行い、架線とのエネルギー授受が行えない場合にバッテリーとのエネルギー授受により力行、回生動作継続可能なことを示した。

(4) 速度80km/hからの回生では、架線完全遮断時にも軸質量14.5トン（さらに付随車遅込め分も含む）の1電動機分について、最大パワー214kW、バッテリーへの回生継続時間30秒、その間に0.86kWh（3.1MJ）をバッテリーに回収しながら速度ゼロまで停止できることを実証した。

今回の実験により、"架線ハイブリッド制御"の基礎ができたと考えている。今後、ハード面では、実車搭載を想定したバッテリー構成や電力変換器の艤装設計、放熱設計を実施していく。また、ソフト面では、走行パターンに応じた放電タイミング制御やエネルギー残量調整、使い方によるバッテリー長寿命化に関する実験を行っていく予定である。

参考文献

1) 金東海，「パワースイッチング工学」，第3章：直流-直流変換，電気学会大学講座，pp49～82，2003