

電力源モデルを用いた 回生電力シミュレーション



小倉 秀文*



正月 一郎**

電車が制動時に使用する回生ブレーキにより得られる回生電力を有効利用することは、環境負荷低減、省エネルギーに効果的である。しかし、回生電力は電車の位置、回生絞込みや回生失効などにより常に変化していて、定量評価することが難しい。

これまで、直流き電電力シミュレーションでは、電車負荷を電流源と仮定して、解析を行う手法が用いられてきたが、本研究では電車負荷を電力源として解析する手法を用いた回生電力の解析結果を報告する。

●キーワード：回生電力、電流源、電力源

1. はじめに

電車が制動時に使用する回生ブレーキにより得られる回生電力を有効利用することにより省エネルギー効果が期待できる。しかし、回生絞込みや回生失効、電車位置の変化などにより回生電力は常に変化している。回生電力の解析には直流き電シミュレーションを用いることが有効である。直流き電シミュレーションでは、電車負荷を電流源⁽¹⁾と仮定し、解析を行うが、さまざまな課題があった。

そこで、本研究では電車負荷を電力源⁽²⁾として解析する手法を採用し、回生電力の定量化をめざすとともに、回生電力の効率的な利用が期待される方策について解析した結果と今後の取組みについて報告する。

2. 電力源モデルシミュレーション

従来の直流き電シミュレーションでは、電車負荷を電流源としてモデル化していた。この場合、電車の電力はパンタ点電圧に依存する。電車は本来、加減速により生じる運動エネルギーに依存した電力を必要としており、パンタ点電圧には依存していない。このため、従来の直流き電シミュレーションでは実情と乖離があるなどの課題があった。これに対し、電力源モデルシミュレーションは、電車が加減速時に必要とする電力を基準として算出する手法である。図1のような電気回路網を想定するとキルヒホッフの法則より(1)式を満たす。電力源モデルでは、電車が必要とする電力をPとすると、 $P=V \cdot I$ を満たすため、電車電流はパンタ点電圧に依存した関数となる。

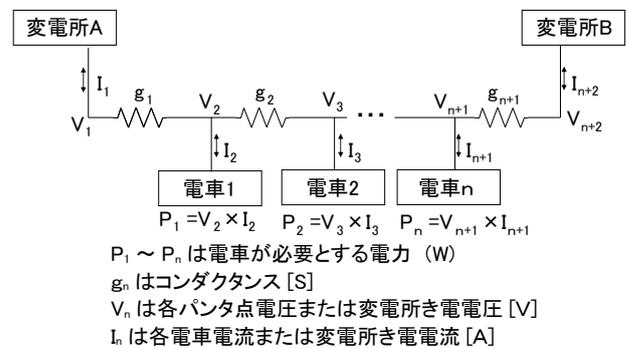


図1 電力源モデルの回路構成

$$\begin{bmatrix} g_1 & -g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & -(g_1 + g_2) & g_2 & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & g_n & -(g_n + g_{n+1}) & g_{n+1} \\ 0 & \dots & 0 & g_{n+1} & g_{n+1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ \vdots \\ V_n \\ V_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ \vdots \\ I_n \\ I_{n+1} \end{pmatrix} \quad \dots (1)$$

各電車電流 I_n は各々のパンタ点電圧 V_n のみに依存しており、 $I_n = I_n(V_n)$ と表すことができる。これを(1)式に代入すると(2)式となる。

$$\begin{bmatrix} g_1 & -g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & -(g_1 + g_2) & g_2 & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & g_n & -(g_n + g_{n+1}) & g_{n+1} \\ 0 & \dots & 0 & g_{n+1} & g_{n+1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ \vdots \\ V_n \\ V_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_0(V_0) \\ I_1(V_1) \\ \vdots \\ I_n(V_n) \\ I_{n+1}(V_{n+1}) \end{pmatrix} \quad \dots (2)$$

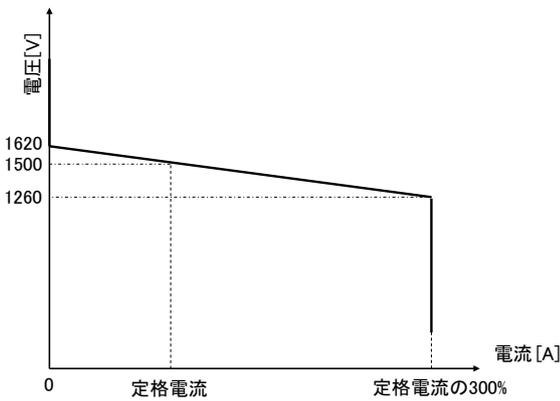


図2 変電所整流器特性図（一例）

なお、変電所のき電電圧およびき電電流は、図2に示したような整流器特性に応じて決まる。

(2) 式は、非線形方程式であるので、ニュートンラプソン法を用いてこの方程式を解き、電車のパンタ点電圧を得る。

電力源モデルシミュレーションを用いて、ある距離に対する架線電圧特性や時刻に対する架線電圧変化を解析し、き電回路網を流れる電流を把握する。これらの結果を用いて電力の流れを解析することで各電車モデルの消費電力および回生電力を得ることが可能である。解析例を図3および図4に示す。

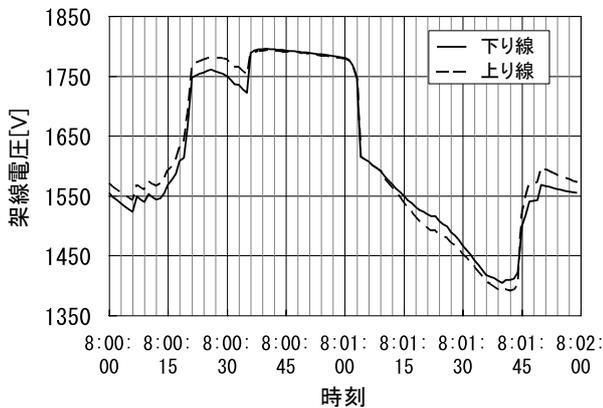


図3 ある地点における時間に対する架線電圧特性

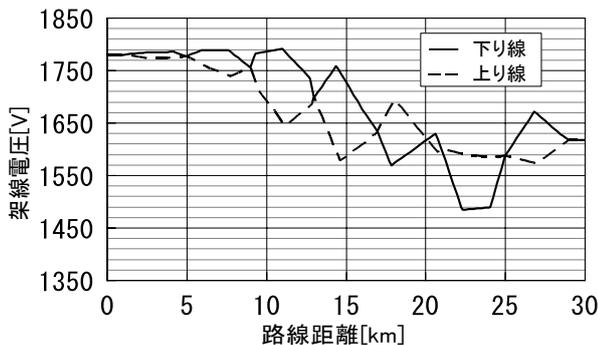


図4 ある時刻における路線距離に対する架線電圧特性

3. 評価モデルの構築

回生電力は、電車の運転密度や駅間隔、電車の運行など、さまざまなパラメータにより変化する。そこで、今回のシミュレーションでは、駅間隔および変電所間隔を一定とし、電車の運転曲線を共通とした評価モデルを構築することにより、回生電力の定量化をめざすこととした。また、電車の運転密度を考慮し、高密度線区（2分間隔）、中密度線区（10分間隔）および閑散線区（30分間隔）の3つに分けることとした。運行する列車はE233系相当（線区最高速度90km/h）の6M4T編成（ただし、閑散線区は4M2T）とした。線区の構成は、30kmの複線、勾配は平坦（0%）とした。

変電所および駅間隔は、各モデルの列車運転間隔に類似している実線区を参考とした。変電所間隔は、対象線区の平均値に基づき、等間隔に配置した。駅間隔については、市街地と郊外では、郊外の方が、駅間隔が長くなるという現実性を考慮し、中間を境に起点側を市街区間、終点側を郊外区間とし、それぞれ等間隔になるように配置した。各モデルの変電所間隔および駅間隔を表1に示す。

表1 変電所間隔および駅間隔

		高密度線区	中密度線	閑散線区
変電所	総数	8変電所	5変電所	4変電所
	間隔	4km	7.1km	9.8km
駅	総数	15駅	13駅	7駅
	市街区間	1.74km (10駅)	2.15km (9駅)	4.61km (5駅)
	郊外区間	3.06km (5駅)	3.49km (4駅)	6.93km (2駅)

4. シミュレーション結果

4.1 回生有効率

回生有効率とは、回生ブレーキを最大限に利用できた場合に発生し得る回生電力の合計に対し、他の電車にて有効利用できる回生電力の合計の割合を示す値として定義する。すなわち、回生有効率が100%のとき、回生電力を最大限利用できたことになる。

4.2 シミュレーション結果

シミュレーションにおけるき電方式は、上下分割き電方式とした。なお、高密度線区および中密度線区についてはラッシュ時間とそれ以外の時間を考慮し、電車の運転密度を5分間隔とした場合についてもシミュレーションを実施した。

図5は高密度線区における駅間における回生有効率の变化である。電車の運転密度が2分間隔の場合は、市街区間では低く、郊外区間では100%となった。解析した結果、回生有効率が100%になっている区間では、停車しようとする電車と出発しようとする電車のタイミングが一致していたため、回生電力がすべて融通されている特殊な例であった。5分間隔の場合は、全区間に渡り90%以上になり、回生絞込みや回生失効がほとんどない状況であった。

図6は中密度線区モデルの場合である。電車の運転密度が10分間隔では、回生有効率は50%から95%程度と変動が激しい結果となった。これは停車しようとする電車と出発しようとする電車のタイミングがずれることにより、回生絞込みや回生失効が発生しやすい区間が存在したためである。運転密度が5分間隔の場合、回生有効率が80%から100%の範囲にあるのは、電車の在線本数が多いため、10分間隔に比べ電車間の回生電力融通がより多くなり、回生有効率が向上したと考えられる。

閑散線区モデルの場合を図7に示す。30kmを概ね30分で電車が走行してしまうことや電車の在線数が少ないことにより、車両間の回生電力融通の機会が少なく、回生有効率は10%から30%程度である。

以上より、簡素化した評価モデルでは、条件によって回生有効率が大きく変化することがわかった。

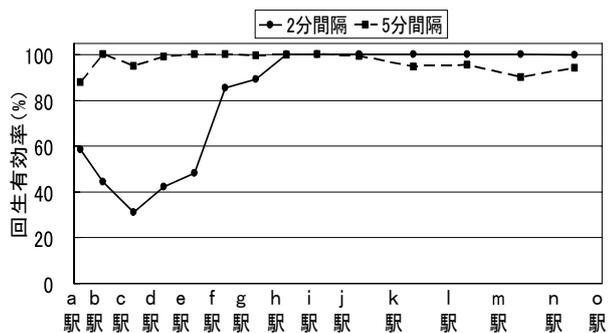


図5 回生有効率の変化 (高密度線区)

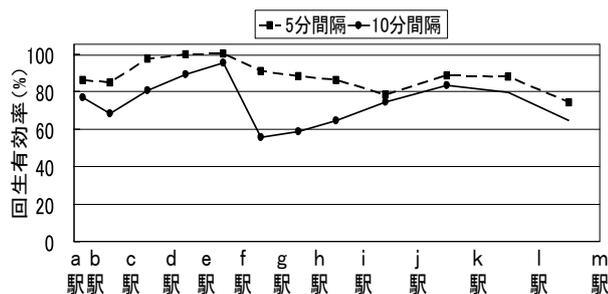


図6 回生有効率の変化 (中密度線区)

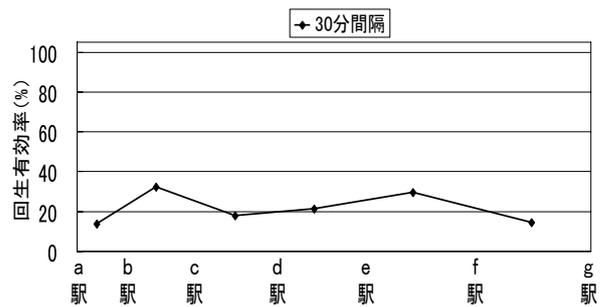


図7 回生有効率の変化 (閑散線区)

5. 回生有効率改善の検討

5.1 回生有効率の改善方策

回生有効率の改善方策として、以下の4つの場合について簡易化した評価モデルにてシミュレーションを行った。なお、き電方式は上下分割き電方式、整流器は電圧変動率8%のダイオード整流器を基本としている。また、シミュレーション結果は、回生有効率の改善方策の効果がわかりやすい中密度線区 (運転密度10分間隔) を代表例として取り上げた。

- (1) 回生電力を上下線間で有効利用する
(き電方式の変更)
- (2) 変電所送出し電圧を制御する
(サイリスタ整流器、PWM)
- (3) 回生電力を交流側へ戻す
(回生インバータ)
- (4) 回生電力を一時的に貯蔵する
(電力貯蔵装置)

5.2 き電方式の変更

直流き電方式を全区間にて変更した場合の回生有効率の改善効果を検証した。結果を図8に示す。上下分割き電方式に比べ、上下タイキ電方式および上下一括き電方式がとも有効であり、その効果は全区間にて2から5%程度の改善である。

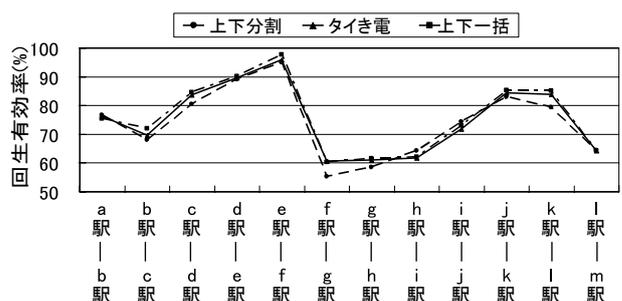


図8 き電方式の違いによる回生有効率の変化

5.3 サイリスタ整流器

変電所送出し電圧を制御して回生絞込みおよび回生失効を減少させることにより、回生有効率を改善する方策ですべての変電所の整流器をサイリスタ整流器に置き換えた場合の結果を図9に示す。定格電流まで変電所送出し電圧が1500V一定であるため、回生電力の絞込みや失効の発生が減少した結果、回生有効率が改善されることがわかった。

5.4 回生インバータ

回生電力を交流側へ戻す方策として、直流変電所のダイオード整流器にインバータを設置した場合について検証した。回生インバータの設置箇所は回生有効率の低い箇所であるh駅-i駅間の変電所1箇所（容量6MW）とした。結果を図10に示す。今回のシミュレーションでは、回生インバータを使用することにより、f駅からj駅間の回生有効率が約20から30%改善されていることがわかった。しかし、回生インバータの設置場所を検討する際には、交流側に流れた回生電力を消費できる負荷が必要となる。

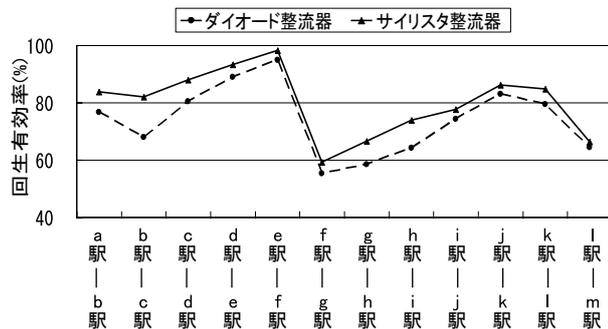


図9 回生有効率の変化（サイリスタ整流器）

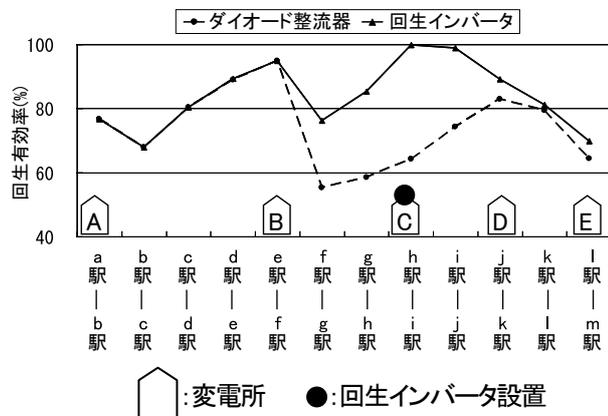


図10 回生有効率の変化（回生インバータ）

5.5 電力貯蔵装置

電力貯蔵装置は、発生した回生電力を充電し、必要な時放電することで、回生電力を効率的に利用することが可能な装置である。電力貯蔵装置の設置箇所は、回生インバータ

と同様とした回生有効率の低い箇所付近の変電所1箇所（使用容量48kWh）とした。今回のシミュレーションでは、f駅からj駅間の回生有効率が約10から20%、改善されていることがわかる。電力貯蔵装置は、回生電力を貯めることが可能であるので、回生有効率が改善した分、回生電力が効率的に利用されていることがわかった。

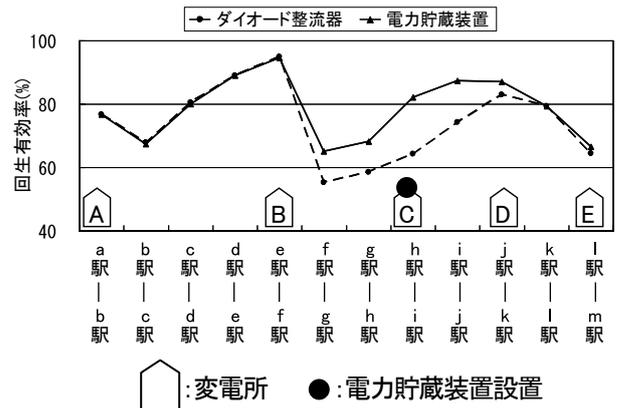


図11 回生有効率の変化（電力貯蔵装置）

6. 今後の取組みについて

簡易化した評価モデルにおいて、定説的に効果があると言われていた方策についてシミュレーションを行った結果、一定の効果が得られる可能性があることがわかった。しかし、今回のように平均値などを用いたモデルでは、運転密度を変化させただけで、回生有効率が大きく変化することや一定の駅間隔では、回生電力の発生するタイミングが常に一致してしまうなど、実際の回生電力の定量評価は難しい。そこで、回生失効や回生絞込みが多く発生していると想定できる線区を対象とした実線区モデルを構築し、電車の運転曲線などをパラメータとしたシミュレーションを行う。

また、実線区モデルによるシミュレーションの結果がどの程度実態と整合しているのかを検証する予定である。具体的には、き電電圧、き電電流、パンタ点電圧や電車電流の計測を行い、その結果とシミュレーションによる結果を比較検証する。検証した結果を活用して、シミュレーションの精度向上を図り、回生電力の有効利用の具体的なツールの作成をめざす。

参考文献

- 1) 電気学会技術報告(II部),第360号,1991
- 2) 長門,他:平成22年電気学会産業応用部門大会, No.3-22,2010