

自然エネルギーと電力貯蔵装置による 電力システムの構築

小西 武史* 吉井 剣* 柴田 直樹*

Establishment of Power Supply System Using Renewable Energy and Energy Storage System

Takeshi KONISHI Tsurugi YOSHII Naoki SHIBATA

Recently, many railway companies have introduced a number of applications of renewable energy such as solar power, wind power in order to promote saving energy. However, renewable energy cannot be used for railway vehicles directly because such energy has a tendency to fluctuate according to meteorological conditions. Therefore, it is necessary to design a stable supply system of renewable energy to make it usable for electrified railways. In this study, we propose a new power supply system using renewable energy and an energy storage system for DC electrified railways. We have indicated the advantage of the system based on the calculation analysis. Furthermore, we have introduced “renewable energy modeling system” for this study. This paper outlines the control methods of the renewable energy modeling system, and the results of tests on comparison between the proposed control methods and the other control method.

キーワード：自然エネルギー，電力貯蔵装置，制御手法，省エネルギー，リチウムイオンキャパシタ

1. はじめに

東日本大震災以降の電力供給機能の低下は、従来のエネルギー施策の方向転換を余儀なくさせた。鉄道分野においては、2012年7月には国土交通省「エコレールラインプロジェクト推進会議」にて、鉄道の消費エネルギーを、2030年までに2010年度比で2割程度削減することが提案されている¹⁾。一方、同じく2012年7月に再生可能エネルギー特別措置法（固定価格買い取り制度：FiT）が施行されたことで、各鉄道事業者においても太陽光発電や風力発電をはじめとする自然エネルギー発電の導入が進められている²⁾。将来は、大容量の自然エネルギー発電を電気鉄道の運転用電源として直接活用することも考えられる。しかしながら、発電出力が気象条件によって変動するケースが多いため、大容量タイプの自然エネルギー発電を鉄道の電力システムに接続するためには、より安定に電力を供給可能なシステムが要求される。一方、近年においては、電車のブレーキ使用時に発生する回生エネルギーの有効活用などを目的とした地上用電力貯蔵装置が実用化されている³⁾。そこで、自然エネルギー発電と電力貯蔵装置を組み合わせることで安定化を実現することが考えられる。実施イメージを図1に示す。①の矢印は通常は自然エネルギー発電システムを系統に適用する場合、②の矢印は電力貯蔵装置を組み合わせるシステム（以下、併用システム）の電力の流れを示す。自然エネルギー発電は直流出力の

* 電力技術研究部 き電研究室

ケースが多いため、通常は三相交流に変換して活用するが、直流電気鉄道に電力供給する場合は再び直流に変換するため、電力変換効率はその分悪くなる。②の方式ならば、1回の直流-直流変換で構築できるため、自然エネルギーの活用における高効率化が期待できる。仮に変圧器、整流器、変換装置（パワーコンディショナ）の効率をそれぞれ99%、98%、94%と定めると、総合効率は①では89%、②では94%となり、5%程度の高効率化が見込める。

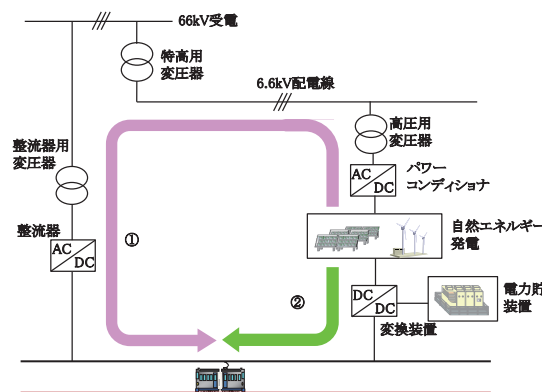


図1 併用システムの実施イメージ

本研究では、自然エネルギー発電と地上用電力貯蔵装置の併用システムの有用性について電力シミュレーションを用いて評価した。次に、併用システムを効果的に運用するための制御手法を検討した。さらに、併用システムのミニモデルを製作し、制御手法の効果について検証試験により評価した。

特集：電力技術

2. 併用システムの電力シミュレーション

併用システムにおいては、自然エネルギーの発電電力が電気鉄道の負荷電力を上回る場合、電力貯蔵装置が余剰電力を充電することにより、システムの出力の安定化を可能にするとともに、発電電力をより有効に活用できる。同時に、電力貯蔵装置が電車の力行時に放電、回生時に充電することにより、直流電気鉄道の変電所の電力を補完し、負荷平準化、回生エネルギー有効利用による省エネ化も期待される。併用システムの基本構成は図2に示す2種類が考えられる。(a)の並列接続は自然エネルギーと電力貯蔵装置をそれぞれ独立に運転することが可能であるが、両者とも直流き電回路に接続するための変換装置が必要であり、高価なシステムとなる。一方、(b)の直列接続は単独で運用することができず制御が複雑になるが、上記変換装置は1組で構築が可能であり低廉化が図れる。ここでは、図2(a)の並列接続した場合の電力シミュレーションを行った。

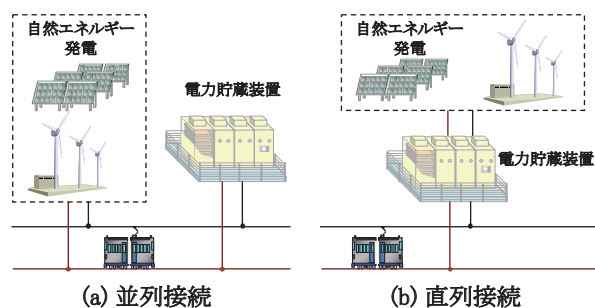


図2 併用システムの基本構成

2.1 計算条件

電力シミュレーションにおけるモデル線区と自然エネルギー発電、電力貯蔵装置の位置を図3に示す。

直流1,500V系統で約30kmの複線区間で、変電所はA～Fの6箇所が設置されている線区を想定した。(a)はD変電所の代替、(b)はB、E変電所を代替する併

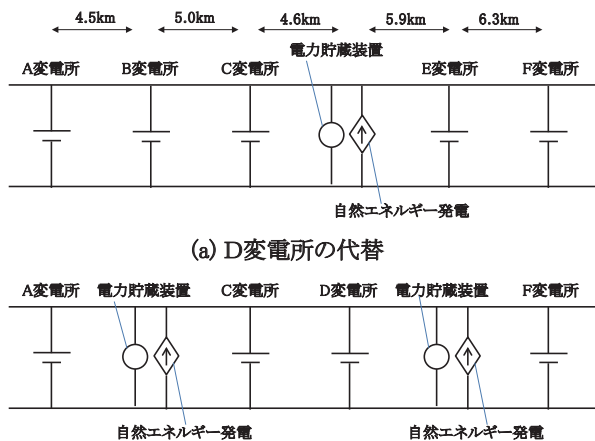


図3 計算における各装置の位置

用システムを設置した場合を想定した。

シミュレーションにおいて、自然エネルギー発電電力は電流源で模擬した。自然エネルギーの発電電流は変動するが、本シミュレーションでは自然エネルギーと回生エネルギーの双方が有効活用される動作を検証するのが主目的のため、簡略化して300A一定とした。電車はインバータ制御車10両編成(6M4T)で統一し、5分ヘッドで上下線を走行する設定とした。電力貯蔵装置は、電気二重層キャパシタ(以下EDLCと略す)と双方向チョップパの構成とした。EDLCは500～1,200Vで変動し、双方向チョップパの降圧動作で充電、昇圧動作で放電を行うものとした。

2.2 省エネ効果の検証

ここでは計算条件と図3(a)のモデルにおける省エネ効果の計算結果を表1に示す。EDLCの静電容量は2種類とし、「-」は電力貯蔵装置がないことを指す。なお、消費エネルギーは、変電所からの供給エネルギーと電力貯蔵装置の損失エネルギーを含む。各々の条件においてエネルギーの違いを計算した結果を以下にまとめる。

表1 装置の組み合わせによる消費エネルギー比較

条件番号	自然エネルギー	EDLC静電容量 (F)	消費エネルギー (kWh)
1	-	50	10,190
2	-	100	10,162
3	-	-	10,406
4	○	50	9,928
5	○	100	9,909
6	○	-	10,160

(-：なし、○：あり)

- (1) 条件3、6と条件1、2、4、5の比較により、電力貯蔵装置を適用することで、容量(EDLCの静電容量)の大きさに従って、エネルギーが216～251kWh低減することがわかる。これは、回生エネルギーの再利用による省エネ効果による。
- (2) 自然エネルギー発電の有無に関して、条件4と1、条件5と2のエネルギー差を比較すると、低減効果は前者(50F)が大きかった。本計算条件においては、自然エネルギー発電の効率の活用の観点からは50F程度の容量が適切と想定される。
- (3) 自然エネルギー発電と電力貯蔵装置の両者ありの場合(条件5)と、両方なし(条件3)の場合のエネルギー量を比較すると、回生エネルギーと自然エネルギーの双方が有効活用されることで、最大で497kWh低減した。

表1の結果から、自然エネルギー発電と電力貯蔵装置の両者を適用すると、各々の装置を単独で適用する場合よりもエネルギーの低減効果が大きいことを確認した。

なお、詳細は省略するが、図3(b)における省エネ効果も、図3(a)の場合と同様の傾向を示した。

2.3 電圧降下補償の検証

次に、図3(b)のモデルにおいて、併用システム適用による電圧降下補償効果を検証した。(b)の場合、2変電所代替によって電車のパンタ点電圧の低下が大きくなり、電力供給の安定性に影響を及ぼす恐れがある。2.2節と同様のパターンで電車の最低パンタ点電圧を計算した結果を表2に示す。

表2 計算による最低パンタ点電圧の比較

条件番号	自然エネルギー	EDLC 静電容量 (F)	最低パンタ点 電圧 (V)
1	—	50	1,128
2	—	100	1,150
3	—	—	1,078
4	○	50	1,143
5	○	100	1,164
6	○	—	1,093

電力貯蔵装置と自然エネルギーの双方がない場合、最低パンタ点電圧は、許容される電車線の最低電圧の目安値とされる1,100Vを下回ったが、併用システムの適用によって50～72V補償され、1,100Vを上回り、最低電圧以上となることが保証された。

3. 併用システムのミニモデル検証試験

図2に示した電力システムを実現するため、本研究では「自然エネルギー発電模擬装置」を製作した。上記装置は三相交流から任意の直流電力を発生させることにより、自然エネルギー発電電力を後述する既定のパターンに従って模擬する。上記装置を既存の電力貯蔵装置と組み合わせた併用システムについて、ミニモデル検証試験を通じて評価した。

3.1 各装置の仕様

自然エネルギー発電模擬装置（最大40kW）と電力貯蔵装置（最大460kW）の併用システムの構成を図4に示す。これは図2(b)に示した直列接続方式である。発電電力は、電力貯蔵装置に一旦充電された後、き電回路に放出される。すなわち、電力貯蔵装置は電車の力行・回生に伴う充放電と発電電力の充電の双方を行う。

自然エネルギー発電模擬装置内の整流器部は三相全波整流回路で構成されており、三相交流210V系を直流270V系に変換する。チョップ部は昇圧チョップ構成であり、電力変換器のスイッチングにより直流-直流変換を行い、電力貯蔵装置の貯蔵媒体の電圧である450～630Vの範囲まで昇圧する。電力貯蔵装置側からの信号を受けて、自然エネルギー発電の出力電力を抑制できる機構を設けた。

自然エネルギー発電模擬装置は、電力変換する際、自然エネルギー発電を模擬した5種類の電力特性を出力することが可能である。パターンAは一定出力の場合を、パターンBは時間に対して線形的に出力が変化する場合を、パターンCはある一定期間に出力が大きく変動する場合を、パターンDは短時間で出力が大きく変動する場合を、パターンEは外部入力による任意波形をそれぞれ模擬する。例としてパターンA、Dの直流出力波形を図5に示す。発電模擬波形は何れも1分間の設定であるが、動作開始時と1分後の出力電力が等しくなるようにした。従って、同じパターンで連続出力させることが可能である。試験において設定するパラメータは同図中に示す(1)～(4)の4種類の値である。パターンEでは、実際の自然エネルギー発電電力と同等の電力を出力する「同時同量制御」も可能とした。

貯蔵媒体は、EDLCの一種であるリチウムイオンキャパシタ（以下LiCと略す）を採用した。電圧範囲は450～630V、静電容量は94Fであり、蓄電電圧で充電率（State of Charge：以下SOCと略す）を算出する。477VがSOC30%に、553VがSOC70%にそれぞれ相当する。

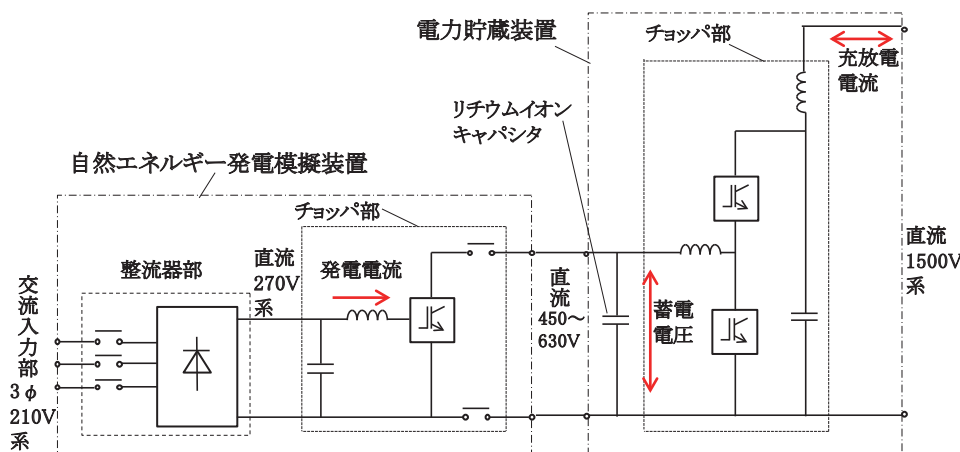


図4 併用システムのミニモデル構成

特集：電力技術

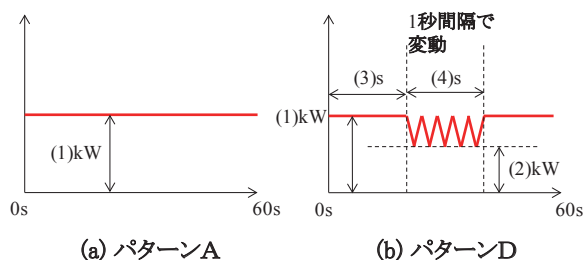


図5 自然エネルギー発電模擬装置の出力波形例

3.2 制御

電車の運転状態（力行・惰行もしくは停止・回生）と自然エネルギー発電模擬装置の発電電力、電力貯蔵装置のエネルギー活用の優先モードに応じて、最適と想定される電力貯蔵装置の充放電モードを選択した。すなわち、表3に示すように、以下に示す3つのモードを選択した。

(1) 通常モード

SOCが低い領域（30%以下）では放電を行わず、SOCを中間付近に保つように制御する。回生電力と自然エネルギー発電の両者がある場合、SOC30%以下の場合を除き、回生電力のみを充電する。

(2) 回生優先モード（回生優先）

SOCが低い領域で待機させるため、30%以下においても放電を行う。回生電力と自然エネルギー発電の両者がある場合、常に回生電力のみを充電する。

(3) 自然エネルギー優先モード（自然優先）

SOCが低い領域では放電を行わず、SOCを中間付近に保つようにする。回生電力と自然エネルギー発電の両者がある場合、SOC70%を下回る範囲では両者を充電し、70%以上では自然エネルギーのみを充電する。

3.3 試験回路

ミニモデル検証試験では、併用システムが表3の各モードに従って動作した場合の効果を検証した。検証試験は、自然エネルギー発電模擬装置、EDLCを用いた電力貯蔵装置、整流器（直流変電所）、実際の電車、所内試験線を用いて実施した。

表3 自然エネルギー発電模擬装置と電力貯蔵装置の動作関係

SOC		30%以下（低）			30%-70%（中間）			70%以上（高）		
		通常	回生優先	自然優先	通常	回生優先	自然優先	通常	回生優先	自然優先
運転状態	自然エネ	通常	回生優先	自然優先	通常	回生優先	自然優先	通常	回生優先	自然優先
力行	なし	—	●	—	●	●	●	●	●	●
惰行・停止	なし	○	—	○	—	—	—	—	—	—
回生	なし	○	○	○	○	○	○	○	○	—
力行	発電	○※1	—	○※1	●※2	●※2	●※2	●※2	●※3	●※2
惰行・停止	発電	○	○	○	○	○	○	○	—	○
回生	発電	両者○	回生○	両者○	回生○	回生○	両者○	回生○	回生○	自然○

○：充電，●：放電，—：停止

※1 自然エネルギー発電電力が力行エネルギーを下回る場合は停止

※2 自然エネルギー発電電力が力行エネルギーを上回る場合は充電

※3 自然エネルギー発電電力が力行エネルギーを上回る場合は停止

試験回路（直流1,500V系）の全体構成を図6に示す。き電模擬抵抗（1Ω）を挿入することにより、整流器と電力貯蔵装置間の距離を模擬した。これにより、試験車両走行時の電力貯蔵装置の架線電圧を変動しやすくした。

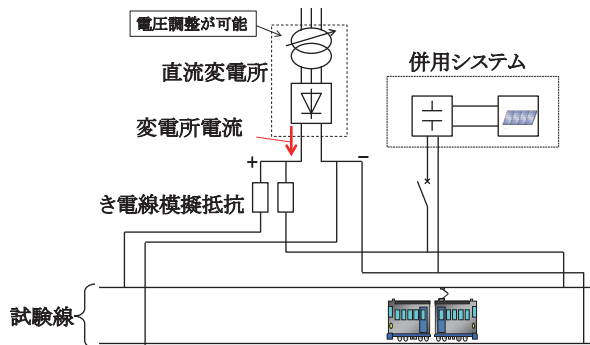


図6 試験回路構成

試験車両は最大45 km/hで走行するが、設備の制約により回生ブレーキは使用できなかった。代わりに直流変電所の交流側（三相6.6 kV）を発電機電源に接続し、発電機の界磁を調整することで交流側電圧を最大6.9 kVまで昇圧させ、直流側電圧も伴って上昇させることにより回生動作を模擬した。すなわち回生模擬における充電電流は直流変電所側から供給されることになる。

3.4 試験結果

表3に示した各制御モードに従って、併用システムを動作させたときの発電・充放電特性を検証した。

試験車両を5分おきに3回走行した際の特性を評価した。自然エネルギー発電模擬装置に関してはパターンA、10 kWで運転した。

3.4.1 通常モード

通常モードでシステムを動作させたときの発電・充放電特性（図6の変電所電流と図4の充放電電流、発電電流、蓄電電圧に相当）を図7に示す。充放電電流の正は充電を、負は放電を示す。蓄電電圧に関しては、SOC30%

(477V) と 70% (553V) を示すラインを併せて示した。

- (1) 電力貯蔵装置の充電電流の最大は 50A、放電電流の最大は 120 A 程度であった。発電電流は約 35 A で一定であるが、回生電力を充電する際は 0A であった。これは、SOC30% 以上の領域で回生・発電の両者が生じると発電を抑制する制御を行うためである。

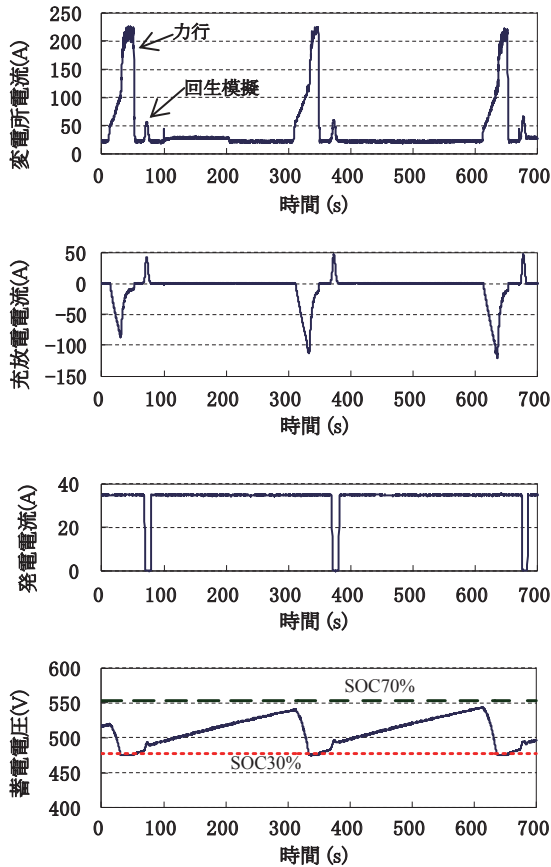


図7 通常モード時の発電・充放電特性

- (2) SOC は 30 ~ 70% の範囲で変動し、試験車両走行毎の SOC の変動はほぼ同一であった。放電によって SOC が 30% に達すると、制御モードに従って放電動作を停止した。その直後に変電所電流が 110A 程度から 220 A 以上まで急上昇した様子が窺える。
- (3) 走行の合間に発電電流を充電することで、SOC は 40% 弱から 60% 強に回復した。

3.4.2 回生優先モード

回生優先モードを選択した際の発電・充放電特性を図 8 に示す。

- (1) 充電電流の最大は 50A、放電電流の最大は 130 A 程度であった。走行毎に充電電流が大きくなり、放電電流は低下する傾向であった。通常モードと同様、回生電力を充電する際に発電電流が 0A となった。
- (2) SOC は 0 ~ 70% の範囲で変動したが、1 回目の試

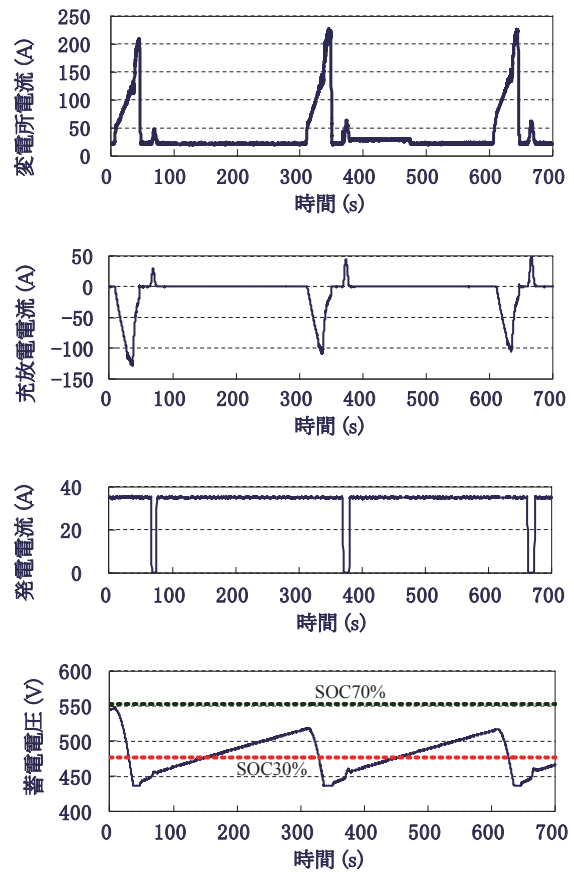


図8 回生優先モード時の発電・充放電特性

験車両走行後は 0 ~ 50% の範囲となった。これは本モードでは回生や発電による SOC の回復レベルが低いためである。最初の走行における放電エネルギーは大きいため変電所電流のピーク値は 200A 強に抑制されたが、2 回目以降は 220 A 以上まで上昇した。

3.4.3 自然優先モード

自然優先モードを選択した際の発電・充放電特性を図 9 に示す。

- (1) 充電電流の最大は 50 A、放電電流の最大は 100 A 程度であり、走行毎の違いは少なかった。他モードと異なり発電電流は常に約 35 A 一定であり、表 3 の設定動作に従って電力貯蔵装置が回生と発電の両者を吸収した。
- (2) SOC は 30 ~ 70% の範囲で変動したが、試験車両走行毎の蓄電電圧の最大値は通常モードより高くなった。これは、回生時においても発電電流を吸収したためと考えられる。放電開始前の SOC が走行毎に高くなるため、変電所電流のピーク値が低下し、ピーク継続時間も短くなった。

3.4.4 考察

試験車両 3 回走行時における変電所の供給エネルギーを図 10 に示す。このエネルギーは回生模擬分も含まれ

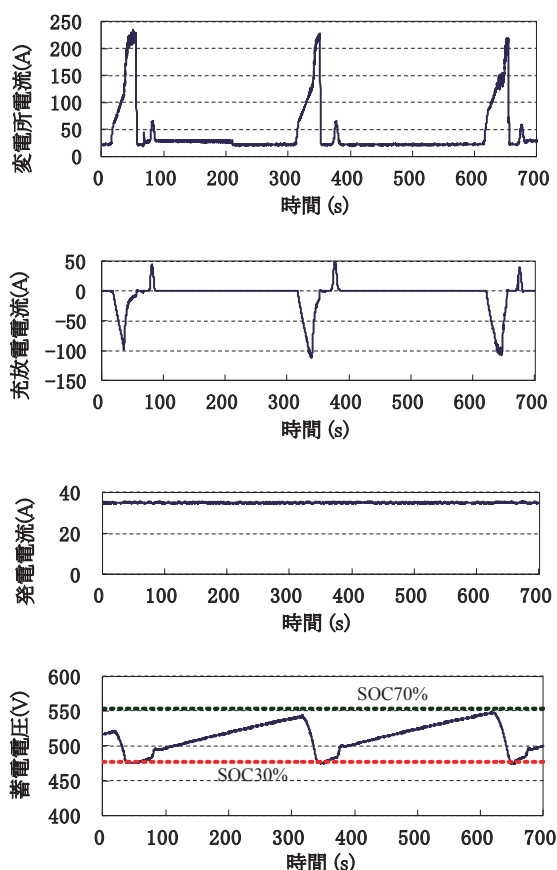


図9 自然優先モード時の発電・充放電特性

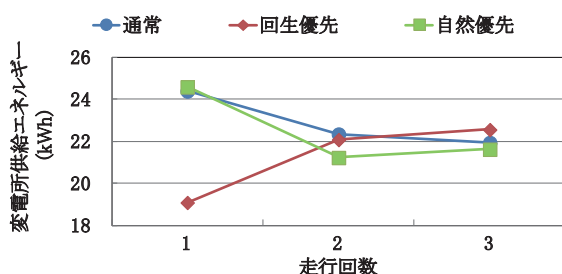


図10 試験車両走行時の変電所供給エネルギーの比較

る。なお、試験車両の走行毎の消費エネルギーには若干の誤差が含まれる。回生優先モードでは1回目の放電エネルギーが大きく影響しており、3回目の走行では逆に最も大きい供給エネルギーを示した。自然優先モードは通常モードよりもやや大きい省エネ効果が得られた。走行をさらに繰り返すと、最終的には自然優先モードが最も省エネ効果が高くなると予想される。

充放電に伴う電力貯蔵装置のSOCの推移は、回生優先モードでは低下する傾向、自然優先モードでは上昇する傾向、通常モードはそれらの中間の傾向を示した。今回のミニモデル検証試験では、最大力行電力に対する最

大回生電力の割合が1/4以下と小さかったことが影響したものと考えられる。逆に回生電力が大きく、自然エネルギー発電電力が小さい場合、上記と反対のSOC推移を示すと想定される。また、電力貯蔵装置のエネルギー容量が比較的小さい場合（既設の回生電力対策用と同等の容量）、SOC変化範囲が大きい回生優先モードが有利であり、逆に大きい場合（負荷平準化用）は長時間の充電が可能となることから自然優先モードが有利と想定される。さらに、高密度線区では多頻度で充放電を行う必要があり、SOC変化範囲が大きい方が望ましい。逆に低密度線区では長時間充電の機会が多いと想定される。

なお、自然エネルギー発電模擬装置の出力波形を他パターンに変更した場合においても、平均出力電力に大きな差はないため、変電所供給エネルギーの有意差も現れなかった。

4. まとめ

自然エネルギー発電と電力貯蔵装置の併用システムをき電系統に設置した場合を想定した電力シミュレーションを実施し、省エネ及び電圧降下補償の効果を定量的に示した。また、併用システムの制御特性や充放電特性を検証するため、ミニモデルによる検証試験を実施した。「回生優先モード」では、蓄電媒体のSOCを低く保つことで、回生電力をより有効活用しやすくなることを確認した。「自然優先モード」では、SOCによらず常に自然エネルギーを充電できることを確認した。

今後、自然エネルギー発電を「地産地消」することが必要とされる際、本研究で示した併用システムが一つの解決手段となる可能性を示した。

なお、本研究の一部は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施したものである。

文献

- 1) 奥井明伸：電力分野のエネルギー利用効率化，第25回鉄道総研講演会，pp.49-55, 2012
- 2) 飯野友記，中平雅士，板屋伸彦，高野富裕：JR東日本における太陽光発電電力の有効活用に向けた取り組み，JREA, Vol.56, No.9, pp.19-22, 2013
- 3) 小西武史，吉井剣，重枝秀紀，平松正宣，尾曾弘：複合する電車負荷による地上用電力貯蔵装置の検証試験，平成24年電気学会産業応用部門大会，No.5-30, pp.257-260, 2012