

## 鉄道電力システムへの「スマートグリッド技術」の適用について



関島 志郎<sup>\*1</sup>



佐藤 栄徳<sup>\*1</sup>



林屋 均<sup>\*1</sup>

### Application of smart grid technology for railway power supply

Shiro SEKIJIMA<sup>\*1</sup>, Hidenori SATO<sup>\*1</sup> and Hitoshi HAYASHIYA<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Electrical & Signal Network system department Railway Operations Headquarters

#### Abstract

Since 2012, JR-East has been making efforts to improve energy efficiency and utilize renewable energy for energy saving and CO<sub>2</sub> reduction. In this report, we describe our efforts such as improvement of utilization of regenerative power, effective utilization of solar power, reduction of power consumption of railway stations and buildings.

●**Keywords:** 回生電力、省エネルギー、電力貯蔵装置、回生インバータ、電力融通装置、太陽光発電、配電系統電圧制御、デマンドレスポンス、ピークカット

## 1. 緒言

東日本旅客鉄道株式会社（以下、JR東日本）では、東日本大震災を契機とした省エネルギーへの関心の高まりや、近年の地球温暖化問題に対するCO<sub>2</sub>排出量削減の重要性が認識される中、鉄道事業におけるエネルギー使用効率の向上や再生可能エネルギーの活用を図っている。

その一環として、当社の電力部門でもエネルギー利用の一層の効率化を目指し、鉄道電力システムへの「スマートグリッド技術」の適用に取り組み、諸施策を実現してきた。本稿では、これまでの取り組み状況について報告する。

## 2. これまでの取り組みの概要

スマートグリッドとは、一般的にICT技術と電力機器技術を組み合わせ、使いきれない電気を貯めたり、別の場所へ送ることで、エネルギーの一層の効率的・効果的な利用を実現する技術として定義される。JR東日本においては2012年より、様々なスマートグリッド関連技術のうち、鉄道関係の電力供給において特に率先して取り組むべき技術として、①列車が停止する際に発生する回生電力の有効利用、②鉄道用地を活用した再生可能エネルギーの導入と有効活用のための制御技術の検証、③駅やオフィスビルでのエネルギーマネジメント、の3つを取り上げて検討、導入、実証を進めてきた。

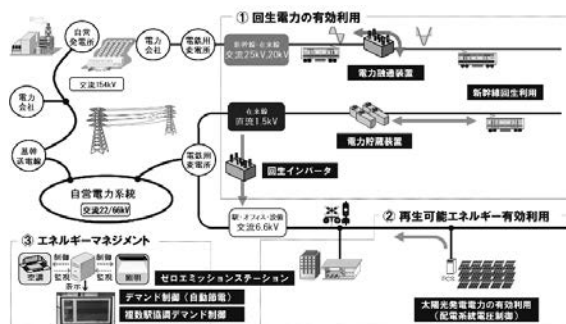


図1 JR東日本のスマートグリッド関連技術適用概要図

## 3. 回生電力の有効利用

近年の電車には、駅停車等の制動時にその運動エネルギーを電気エネルギーに変換、付近に走行している他の電車に供給してブレーキ力を得る回生ブレーキを搭載しており、鉄道における運転エネルギー削減に寄与している。ただ、この回生ブレーキ動作時に発生する回生電力は付近に力行車両等の負荷が存在していない場合には消費されないため、回生電力を発生させる車両側で出力を減少させて機械ブレーキに移行する回生絞り込みや回生失効という状態となり、車両が持つ運動エネルギーを有効に利用することができない。

JR東日本ではこの課題を解決するために、直流き電区間には電力貯蔵装置や回生インバータ装置を、交流き電区間には電力融通装置（RPC装置）の導入を進めてきた。実測したところ、都心部の列車密度が高い線区ではこの回生電力は列車間で融通されて有効に使用されていたが、郊外部の編成両数が長く、列車密度が中程度の線区では回生失効などが発生する頻度が比較的高く、活用できていない回生電力が多くあることが確認できた。このことから、回生電力を有効利用する装置の導入地点としては、東京駅から50km程度離れた場所が多い。図2にこれらの装置の導入地点を示す。



図2 回生電力有効利用装置の導入状況

### 3・1 電力貯蔵装置

電力貯蔵装置は失効してしまう回生電力を時間差で融通する装置であり、電車の制動時に付近に負荷が存在していない場合に、回生電力を蓄電池に充電、次に付近で力行する電車が存在するときに蓄電池から放電して充電された電力を使用する。

JR東日本では2008年に中央線相模湖TTPに電気二重層キャパシタ（EDLC）、2012年から2013年にかけて青梅線古里SSにニッケル水素電池（以下、Ni-MH）の装置を試験的に導入した。その後、2013年に拝島SSへのリチウムイオン電池（以下、Li-ion）を用いた装置を導入したことを皮切りに、2014年に桶川SS（Li-ion）、2016年に久喜SS（Ni-MH）の装置が稼働し、2019年1月には北千住SS（Li-ion）の装置も稼働を開始した。この電力貯蔵装置の概要を図3、仕様を表1に示す。

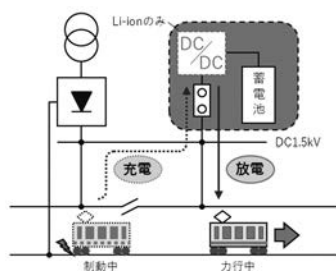


図3 電力貯蔵装置の概要図

表1 電力貯蔵装置の仕様

| 蓄電媒体     | Li-ion        | Ni-MH          |
|----------|---------------|----------------|
| 入出力制御装置  | DC/DC コンバータ   | なし             |
| 制御装置定格容量 | 2000kW        |                |
| 定格電流     | 1200A         |                |
| 電池定格電圧   | 692V          | 1512 または 1548V |
| 電池容量     | 76 または 137kWh | 232 または 426kWh |

稼働実績として、年間の放電電力量は拝島SSの装置では全き電電力量の約4%の約400MWh、桶川SSの装置では全き電電力量の約8%の約750MWhが得られた。また、放電電力量の傾向として、夏期や冬期には放電電力量が減少することが確認できた。

これは、夏期や冬期には車両の空調などによる補機負荷が大きくなることから、回生電力もこれらに使用されてしまい、回生電力の余力が減少するためと考えられる。

### 3・2 回生インバータ装置

回生インバータ装置は失効してしまう回生電力を発生と同時に負荷へ融通する装置であり、き電用変電所に直流から三相交流に変換するインバータ装置を設置し、回生電力を駅等の電気設備に供給する。図4にこの装置の概要を、表2に今回導入した装置の仕様を示す。

一般的に地上駅の使用電力は回生電力よりも小さく、このような駅ではすべて使うことができない。このため、この装置は地下鉄事業者を中心に数多く導入されているが、このたび高崎線吹上変電所と京葉線鍛冶橋変電所にJR東日本としては初めて設置し、2018年より使用開始した。

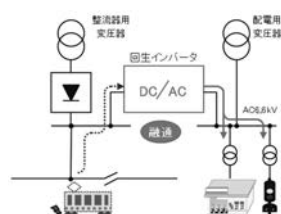


図4 回生インバータ装置の概要図

表2 回生インバータ装置の仕様

|        |                          |
|--------|--------------------------|
| 回路構成   | PWM 変換装置                 |
| 定格直流電圧 | 1500V                    |
| 容量     | 1000kW (100%連続、300%1 分間) |
| 動作開始電圧 | 1600V～1800V (1V 単位で可変)   |
| 定格交流電圧 | 460V (変圧器にて昇圧して系統へ出力)    |
| 冷却方式   | 風冷                       |

### 3・3 電力融通装置 (RPC装置)

常磐線の藤代・土浦間は通勤利用者が多く、JR東日本の在来線交流き電区間の中では最も輸送量が大きい線区である。近年の更新により、この区間を走行する電車はすべて回生ブレーキ付きの車両となった。そこで、現地での測定や検討を行った結果、この区間にも他の郊外線区と同様に回生電力の余力があることが確認された。このため、牛久き電区分所（牛久SP）に異なるき電区間へ電力を融通するRPC装置を設置、2015年4月より本格的に稼働した。RPC装置の概要を図5、その仕様を表3に示す。

使用開始後の稼働実績として、年間約2500MWhの回生電力を有効活用できていることが確認できた。

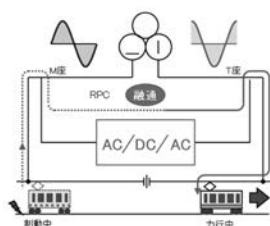


図5 RPC装置の概要図

表3 RPC装置仕様

|         |                                             |
|---------|---------------------------------------------|
| 定格電圧    | 22kV                                        |
| 電圧変動範囲  | 連続：18kV～24kV、瞬時：16kV                        |
| 定格出力    | RPC モード 1300kW<br>過負荷 5300kW 1 分間           |
| 主回路構成   | 単相3 レベル変換器 3 多重                             |
| 変換器用変圧器 | 定格容量：1300kVA (440kVA×3)<br>定格電圧：22kV/3.25kV |

### 3・4 新幹線回生電力有効利用

高速で走行する新幹線では、制動をかける際に大きな回生電力が発生しており、区間によっては大きな回生電力の余力が発生している。これまで、この余力を有効に活用する方策として、蓄電池を組み込んだ電力融通装置や新幹線の回生電力を在来線に融通する装置などを検討してきた。しかし、短時間の大きな回生電力吸収のために装置容量が大きくなり、また電圧階級が高くなることから小容量機器でもサイズが大きくなるため、省エネ効果や設置スペースの確保などに課題があり、導入を見送ってきた。

ただ、回生電力の余力は在来線よりも大きいことから、今後もこれを有効利用する装置の導入に向けた検討に取り組むこととしている。

## 4. 太陽光発電電力の有効利用

近年、CO<sub>2</sub>排出量削減の取り組みの一環として、JR東日本ではホーム上屋や未利用土地に太陽光発電（以下、PV）設備の設置を行っている。また、一つの系統にPV設備を多く導入する際に発電された電力を最大限利用するため、複数の太陽光発電設備の出力を連携して制御する系統電圧制御技術の確立にも取り組んだ。

### 4・1 ホーム上屋への導入（高崎駅、東京駅など）

鉄道事業者各社においてはホームや駅舎等の屋根を活用したPV設備導入に取り組んでいる。JR東日本でも、2001年に高崎駅新幹線ホーム上屋（200kW）や2011年に東京駅東海道線ホーム上屋（435kW）などにPV設備を設置し、電力を駅の負荷に供給している。

### 4・2 平泉駅ゼロエミッションステーション

東北本線の平泉駅では、PV装置（78kW）とリチウムイオン電池（240kWh）を設置し、日中発電した電力を貯蔵して、夜間使用する電力を賄うことでゼロエミッションを可能としたシステムを構築した。2012年の使用開始から2年間の実績として、夏季を中心に392日のゼロエミッションを達成した。

### 4・3 京葉車両センターのメガソーラー

京葉線の京葉車両センターの未利用地に出力1050kWの太陽光パネルを設置し、JR東日本初の大規模太陽光発電設備（メガソーラー）として2013年に発電開始した。この発電電力は京葉車両センター構内で消費するほか、配電線路を経由して鉄道運行にも活用している。

### 4・4 配電系統電圧制御

PVによる発電電力を配電系統に逆潮流させると配電系統の電圧が上昇する。ただ、配電系統の電圧が大きく上昇すると、その配電系統に接続されている機器に影響を与えることとなるため、配電系統電圧の制限値を超えないようにPV設備の出力を制御する必要があり、この出力制御では電圧上昇を抑えられない場合にはPV発電量を抑制させることとなる。

そこで、PV設備のパワーコンディショナ（以下、PCS）が出力電圧制御機能として持つ、無効電力制御を複数台で連携させ、配電系統の電圧上昇を抑え、より多くのPV発電量を使用可能とした技術を確認（図6）、メーカー工場内および京葉車両センターにおける実証試験により検証を行った（図7）。

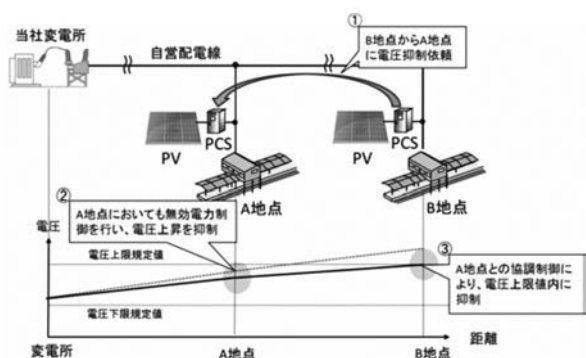


図6 複数のPCSによる協調無効電力制御の概要

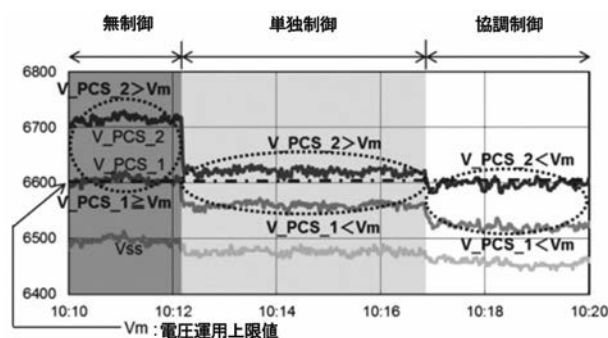


図7 工場内試験時の連系点電圧の変化

## 5. デマンドレスポンスの活用

JR東日本は発電から負荷までの設備を一元的に管理しているため、電力需給動向により使用電力量をコントロールし、適切に需要管理を行う技術が重要と考えている。

この適切な需要管理を行うための方法の一つとして、駅やオフィスビルにて電力使用が過大になったときに自動的に照明や空調などの負荷機器を制御して、節電を行う「デマンドレスポンス」の導入を行った。

### 5・1 オフィスビルにおけるデマンドレスポンス

JR東日本千葉支社ビルでは、2012年に移転新築となった際にJR東日本で初めてのデマンドレスポンス（以下、DR）のシステムが導入された。このシステムの構成を図8に示す。

DRでは30分積算電力値からの予測値および瞬時電力値にて制御信号を発信し、照明の調光や空調室外機の段階出力制御によってビルの使用電力量を制限する。実証試験にて、消費電力量抑制効果や視覚環境変化、温熱環境変化について検証を行った。その結果、消費電力量抑制効果が確認でき、その中でも空調設備の制御による効果が大きいということが確認できた。ただ、温熱環境評価指数であるPMV（Predicted Mean Vote）とPPD（Predicted Percentage of Dissatisfied）にて室内環境への影響を確認したところ、空調が30分間停止すると環境が急激に悪化する（図9）する結果となり、仕事環境に影響を与えない範囲でDRを実施する上でのいくつかの指針を得ることができた。

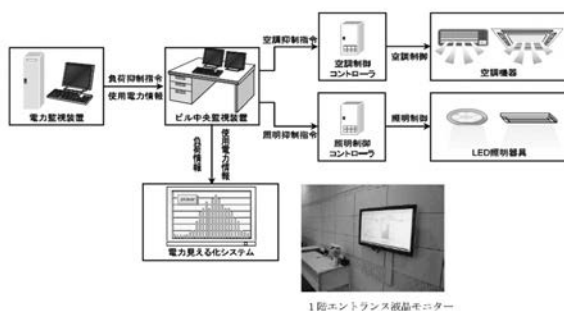


図8 デマンド制御システムの構成

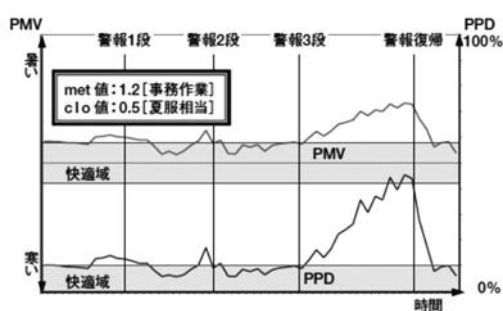


図9 空調停止時の評価指数の変化

### 5・2 駅におけるデマンドレスポンス

駅設備に対してDRを行うシステムを、2014年に恵比寿、西船橋、国分寺の3駅に導入した。駅の負荷設備には、駅社員業務用の設備以外にもホーム照明等のお客様の安全にかかわる設備、コンコース照明や空調等のお客様サービスに関わる設備もある。今回、制御対象設備としてはお客様への影響度や滞留時間を考慮し、①制御しないエリア、②制御できるが優先度が低いエリア、③制御できるエリア、④制御優先度が高いエリアの4段階にエリアに分類した。図10に制御対象負荷割合を示す。

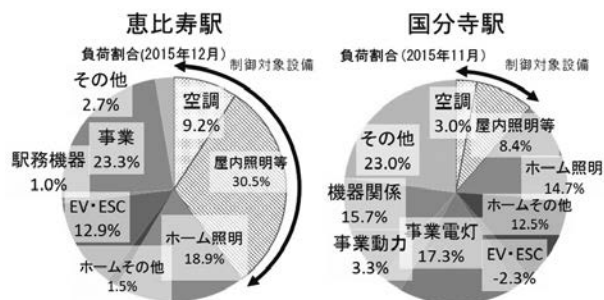


図10 駅の負荷割合（恵比寿、国分寺）

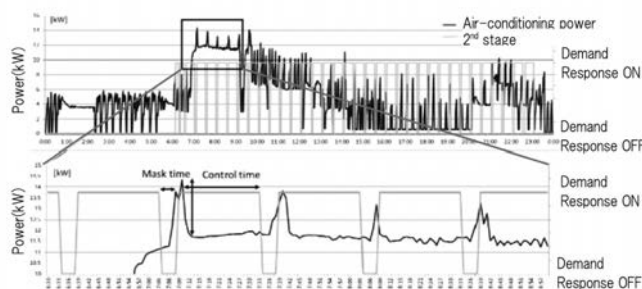


図11 デマンドレスポンスの効果（空調）

この時に実施した駅でのDRでは30分間の消費電力量を1分ごとに計測したデータをもとに予測しながら制御を行っているが、最初の数分間は正しい予測デマンド算出ができない可能性があるためマスクをかけている。このため、制御効果としてはマスク時間帯の出力と制御されている時間帯の出力を比較することにより算出した。DRの動作の一例を図11に示す。

この検証結果より、3~12%のピーク電力削減効果が確認でき、1日あたりの効果から季節変動を考慮して年間の消費電力量を算出した結果、恵比寿駅では年間46MWh、3%程度の削減効果が確認できた。

## 5・3 複数駅協調デマンドレスポンス

複数駅協調デマンドレスポンス装置は、駅単体のDR装置を相互に連携させて配電系統のピーク電力を抑制し、設備容量の増加を抑えるために設置した。今回はこの装置を、中央線の東小金井、武蔵小金井、国分寺の3駅が接続される配電系統に導入した。(図12)

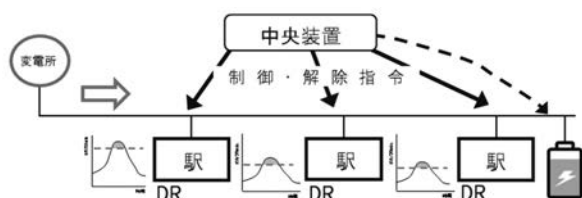


図12 複数駅協調DRシステム

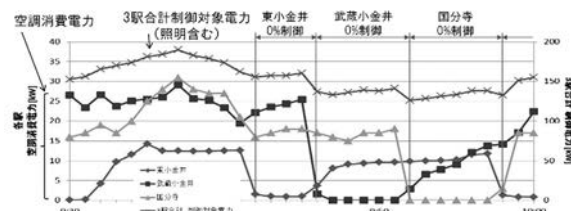


図13 空調輪番制御の効果（冬期）

このシステムでは、各駅のDRシステムを介して3駅合計の消費電力をリアルタイムで計測し、デマンド目標値の超過が予想される各駅の状態から制御優先順位により制御信号を出す。

検証の結果、ピーク電力削減効果は3駅合計の電力に対して概ね2~3%の削減となり、空調の起動停止を3駅で順番に行う空調輪番制御を行うことにより概ね7~9%の削減効果が確認できた（図13）。

## 6. おわりに

JR東日本では電気鉄道へのスマートグリッド関連技術適用の取り組みとして、回生電力や太陽光発電電力の有効利用、需要地点における電力消費量の最適化をするために各種システムを検討、導入、実証を行ってきた。

今後もJR東日本で掲げた消費電力量削減やCO<sub>2</sub>排出量削減の目標達成に寄与すべく、エネルギーの有効かつ効率的な利用に取り組んでいきたい。

### 参考文献

- T.Suzuki, H.Hayashiya, T.Yamanoi, K.Kawahara, "Introduction and Practical Use of Energy Storage System with Lithium-ion Battery for DC Traction Power Supply System", 電気学会論文誌D, Vol.136, No.1 (2016)
- 飯野友記, JR東日本における車両回生電力有効利用に向けた取り組み、鉄道と電気技術, vol.28, No.1 (2017), pp.13-17
- 藤田、小倉、中平、回生エネルギーの効率的な利用に関する調査研究, JR EAST Technical Review (in Japanese), No.51 (2015), pp.33-36
- 日野、原、リチウムイオン電池式電力貯蔵装置の活用について, JR EAST Technical Review (in Japanese), No.51 (2015), pp.37-40
- 青木、堀、岡、林屋、「簡易的な回生電力評価手法の提案」, 電気学会論文誌D, Vol.135, No.4, pp.348-354 (2015)
- 新妻、白井、佐藤、常磐線へのき電区分所設置型電力融通装置 (SP-RPC) の導入, JREA, vol.58, No.12 (2015), pp.40013-40016
- 林屋均、新技術導入でエネルギー効率を改善-電気鉄道の事例から-, 月刊エネルギーレビュー, vol.36, No.5 (2016), pp.7-11
- 林屋均、「総論 鉄道の環境優位性」, 技術総合誌オーム, No.11 (2016), pp.4-7
- 及川、鈴木、遠藤、工藤、鎌田、駒込、藤田、林屋、棟方、平泉「ゼロエミッションステーション」の2年間の運転実績, 電気学会産業応用部門 交通・電気鉄道研究会資料, TER14038, (2014)
- 橋口、山田、中平、太陽光発電電力の有効活用に向けた配電系統電圧制御の研究, JR EAST Technical Review (in Japanese), No.51 (2015), pp.65-68
- 齊藤、林屋、松崎、宮川、橋口、上野、中平、南之園、鉄道配電線路上における配電系統電圧制御による沿線太陽光発電電力の有効利用, 電気学会論文誌D, Vol.138, No.9 (2018), pp.715-722
- 坂口、野田, JR東日本におけるエネルギーマネジメントの取り組み-オフィスビル・駅へのデマンドレスポンスの導入-, JREA, vol.56, No.9 (2013), pp.37993-37996
- 白石、野田, JR東日本千葉支社ビルの省エネ施策について, 鉄道と電気技術, vol.25, No.1 (2014), pp.24-29
- 小野田、齊藤、桑村、坂口, 駅におけるデマンドレスポンスの取り組み, 電気学会産業応用部門 交通・電気鉄道研究会, TER-17-037 (2017)
- 堀口、保坂、桑村、坂口, 複数駅デマンド協調制御の取り組み, 電気学会産業応用部門 交通・電気鉄道研究会, TER-18-053 (2018)