

電力貯蔵，太陽光発電，余剰回生電力を併用する駅負荷の長期的な省エネ効果の検討

○ [電] 赤井 秀行（上智大学）

[電] 宮武 昌史（上智大学）

Study of the Long-term Energy-saving Effect of Station Loads Using

Energy Storage System, Photovoltaic Generation, and Excess Regenerative Power

○AKAI Hideyuki (Sophia University)

MIYATAKE Masafumi, (Sophia University)

Applying solar photovoltaics and energy storage system for railway stations is one of the solutions to realize energy saving in the railway system. Additionally, the technology that can utilize power from the train's regenerative braking for the station loads has been developed. In the future, these multiple power and storage systems could be used together in the station. Thus, the methodology for energy management of such a station is important. In this research, the simulation method based on mixed-integer linear programming (MILP) is developed, which can optimize the control of charge and discharge of the energy storage system considering the pattern of generation of photovoltaics and regenerative power. And the annual energy-saving effect of such a station is evaluated using this method in case studies.

キーワード: 省エネルギー，駅，エネルギーマネジメント，回生電力，太陽光発電，混合整数線形計画法

Key Words: Energy saving, Station, Energy Management, Regenerative Power, Photovoltaic Generation, Mixed-Integer Linear Programming

1. はじめに

駅の省エネルギー化を図る動きが広がっている。例えば、プラットフォーム上屋への太陽光発電（以下 Photovoltaic: PV）の導入¹⁾、蓄電システム（以下 Energy Storage System: ESS）の応用²⁾、そして列車からの余剰回生電力（以下 Regenerative Power: RP）の駅負荷への有効利用³⁾などが、各鉄道事業者において積極的に行われている。地下鉄を除く日本の鉄道用エネルギー使用のうち 20%程度が駅負荷などの付帯エネルギー使用である⁴⁾。鉄道システムの環境負荷低減のため、駅の省エネルギー化は今後も広がっていくと考えられる。

こうした多様な電源や ESS が導入される中で重要となるのが、システムのモデル化と最適化に基づいた年単位の省エネルギー効果及びコストの検証である。過去には、PV、ESS、ヒートポンプ、蓄熱槽を持つ駅のモデル化と最適化によるコスト評価が行われた⁵⁾。また海外では、PV、ESS、RP を併用する駅のモデル化と最適化手法が提案され、様々なシナリオを想定してコスト評価が行われた⁶⁾。筆者らが知る限り、実際に PV、ESS、RP を併用する駅の例はほとんどないが、このような背景や先行調査を踏まえれば、

将来的に上記のような駅は増えると予想される。そしてそのモデル化と最適化に基づく省エネルギー効果及びコストを検討することは意義のあることだと考える。

筆者らはこれまで、PV、ESS、RP を併用する鉄道沿線施設の最適運用計画を導出する手法を示してきた⁷⁾。本稿ではこれを改良し、PV、ESS、RP を併用する駅負荷を想定した新たなエネルギーモデルを考える。そして、そのモデルの最適なエネルギーフローを求める問題を混合整数線形計画問題（以下 Mixed-Integer Linear Programming: MILP）として定式化する。最後に、ケーススタディにおいてこのモデル化と最適化手法を検証し、システムの年間コストと消費エネルギーの評価を行う。本手法を用いることで、PV、ESS、RP を併用する駅の、年単位の省エネルギー効果及びコストを試算可能であることを示す。

2. エネルギーモデルと最適化

2.1 エネルギーモデル

本稿では、PV、ESS、RP、そしてそれらを併用する駅負荷で構成される図 1 のようなエネルギーモデルを考える。まず、PV から電力系統（以下 Grid）へ逆潮流できるものとし、固定価格買取制度（FIT）に基づき買取される

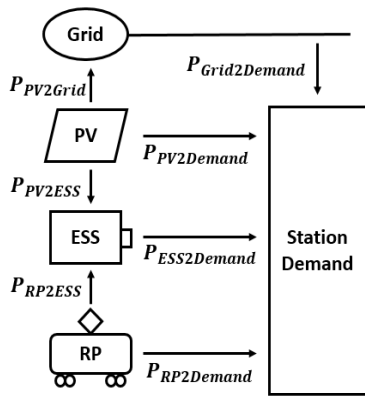


図1 想定するシステムのエネルギーモデル

ものとする。実際はPVから逆潮流した電力は鉄道沿線の
高圧配電線路を通じて他の駅や沿線施設へ送られる⁸⁾が、
今後PVが駅などへ大量導入された際の配電線路の電圧安
定性を考慮し、PV発電電力は他の駅などへ送られないも
のとする。一方で、非FIT設備であるESSやRPからGrid
へ逆潮流はできないものとする。また、ESSはPVとRP
からのみ充電され、Gridとは直接やり取りしないとする。

2.2 最適化

図1のエネルギーモデルの最適なエネルギーフローを求
める問題を、先行研究^{9),10)}を参考にMILPとして定式化す
る。最適化の目的は、30分ごとのPV発電量、RP吸収量、
駅負荷消費電力量パターンを考慮してESSの充放電量を
制御し、1日のコストを最小とすることである。30分ごと
としているのは、一般に電力会社や電力市場との取引が30
分単位で行われることを踏まえたものである。定式化で用
いる各パラメータを表1のように定義する。

表1 設定パラメータの詳細

入力値	
P_{Demand}	駅負荷消費電力量 [kWh]
P_{PV}	PV 発電量 [kWh]
P_{RP}	RP 吸収量 [kWh]
C_{buy}, C_{sell}	電力量料金, PV 買取価格 [円/kWh]
η	エネルギー変換効率
η_{ch}, η_{disch}	ESS 充放電効率
Q_c, Q_{min}, Q_{max}	ESS 容量, 最小最大充電量 [kWh]
r	ESS 充放電係数
P_{max}	契約電力 [kW]
変数	
$P_{Grid2Demand}$	系統⇒駅負荷の電力量 [kWh]
$P_{PV2Grid}$	PV⇒系統 逆潮流電力量 [kWh]
$P_{PV2Demand}$	PV⇒駅負荷の電力量 [kWh]
P_{PV2ESS}	PV⇒ESS の充電量 [kWh]
$P_{ESS2Demand}$	ESS⇒駅負荷の放電量 [kWh]
P_{RP2ESS}	RP⇒ESS の充電量 [kWh]
$P_{RP2Demand}$	RP⇒駅負荷の電力量 [kWh]
Q	ESS の充電量 [kWh]
u_{PV} (バイナリ)	系統との売買に関する制約に使用
u_{ESS} (バイナリ)	ESS 充放電に関する制約に使用

表2 MILP の目的関数と制約条件

目的関数	
$\text{Min} \sum_{i=1}^{48} \{C_{buy}(i)P_{Grid2Demand}(i) - \eta C_{sell}(i)P_{PV2Grid}(i)\}$	(1)
制約条件	
$P_{Demand}(i) = P_{Grid2Demand}(i) + \eta P_{PV2Demand}(i) + \eta P_{RP2Demand}(i) + \eta P_{ESS2Demand}(i), \forall i$	(2)
$P_{PV}(i) = P_{PV2Grid}(i) + P_{PV2Demand}(i) + P_{PV2ESS}(i), \forall i$	(3)
$P_{RP}(i) = P_{RP2Demand}(i) + P_{RP2ESS}(i), \forall i$	(4)
$Q(i) = Q(i-1) + \eta \cdot \eta_{ch} \{P_{PV2ESS}(i) + P_{RP2ESS}(i)\} - (1/\eta_{disch})P_{ESS2Demand}(i), i = 2 \sim 48$	(5)
$\eta \{P_{PV2ESS}(i) + P_{RP2ESS}(i)\} \leq u_{ESS}(i) \cdot r \cdot Q_c, \forall i$	(6)
$P_{ESS2Demand}(i) \leq \{1 - u_{ESS}(i)\} \cdot r \cdot Q_c, \forall i$	(7)
$Q_{min} \leq Q(i) \leq Q_{max}, \forall i$	(8)
$Q(1) = Q(48)$	(9)
$P_{PV2Grid}(i) \leq u_{PV}(i) \cdot P_{PV}(i), \forall i$	(10)
$P_{Grid2Demand}(i) \leq \{1 - u_{PV}(i)\} \cdot (P_{max}/2), \forall i$	(11)

そして、目的関数と制約条件を表2のように定義する。
まず、目的関数(1)式はPV発電電力の買取も考慮した1日
のコストを最小とするものである。また、1日を30分ごと
に48分割したため、各時間帯を表す添字*i* (以下、時間断
面と呼ぶ)によりそれが表現されている。(2)式は各時間断
面における駅負荷の受給バランスを満たすための制約であ
る。(3)(4)式はそれぞれ、各時間断面におけるPV発電量と
RP吸収量の絶対量に関する制約である。(5)式はESS充電
量の連続性に関する条件である。(6)(7)式は、ある時間断
面において、ESSは充電・放電のどちらかしかできないとす
る制約である。ただし、秒単位では駅負荷消費電力に応じ
て充放電を繰り返すことが想定されるが、ここではその挙
動は無視している。(8)式はESSの最小・最大充電量の制
約、(9)式は初期・終端充電量が等しくなるように設定し
たものである。最後に、(10)(11)式は、ある時間断面にお
いて系統からの電力購入とPV発電電力の売電のどちらか一
方のみとする制約を表している。

3. ケーススタディ

3.1 ケーススタディの概要

ケーススタディにより、PV、ESS、RPを併用する駅の
省エネルギー効果やコストを、2章で示したモデル化と最
適化手法を用いて試算可能であることを示す。まず、各要
素について、月別平均30分毎のエネルギー変動パターン
を計算やデータベースにより作成する。その後、4つの設
備導入ケースに対して、月別平均ごとのエネルギーフロー
導出を行う。最後に、そのエネルギーフローの結果を用い
て、ケース別に年間コストや消費電力量の比較を行う。

3.2 各要素のエネルギー変動パターンの作成

(1) 駅へ導かれる余剰回生電力

駅へ導かれるRP吸収量パターンは、簡易的な電回路
シミュレータを作成した上で、実際に導入されている回生

電力吸収装置⁹⁾の動作原理を参考に計算した。まず、列車の運動を、車両特性を考慮して運動方程式に基づき計算した。そして、変電所や各列車を電流源とみなしてキルヒホッフの法則に基づき回路計算を解き、各駅付近の電圧分布を1秒単位で導出した。駅付近のき電電圧が回生電力吸収装置の判定電圧以下の時は、き電線から駅へ電力は送られず、判定電圧以上の時に、き電線から装置の定格出力 200 [kW]を駅へ導くものと仮定し、30 分ごとに電力量として精算した。そして、最も吸収電力量が多いと計算された駅での値をケーススタディのデータに用いることとした。

シミュレーションには一般的な都市通勤鉄道路線を想定した。列車ダイヤや運行方法は1年を通じてすべて同じものを用いたが、春秋季、夏季、冬季で列車の補機電力を変化させた。

(2) PV 発電量

PV 発電量パターンは、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）が公開している、1990年から2009年の東京地点における月別日射量データ⁹⁾を平均して作成した。なお、日射量から発電量への変換には $E = H \cdot K \cdot P / G$ という関係を用いた。ここで、E は PV 発電量[kWh]、H は日射量[kWh/m²]、G は標準状態における日射強度[kW/m²]、K は設計係数、P は PV 最大出力[kW]である。G、K はそれぞれ、1[kW/m²]、0.85、とし、PV 最大出力 P は 300[kW]を想定した。

(3) 駅負荷消費電力量

駅負荷消費電力量パターンは、文献⁹⁾から入手したデータを参考に作成した。本文献中の駅負荷曲線図をトレースし、規格化した。そして、最大消費電力 100[kW]程度である小～中規模駅相当の消費電力量パターンを作成した。

以上(1)～(3)の手順により、次頁図2のような月別平均電力量パターンデータを作成し、それをケーススタディに用いた。

3.3 条件設定

表3 ケーススタディで用いるパラメータ

蓄電池に関するパラメータ	
$Q_c, Q_{\max}, Q_{\min}$	500, 450, 150 [kWh]
$Q(1), Q(48)$	250 [kWh]
η_{ch}, η_{disch}	0.95
r	0.15 (30 分間で 75 [kWh] 充放電可)
電力量・買取料金に関するパラメータ ¹⁰⁾	
基本料金	1,606 [円/kW]
C_{buy}	15.65 [円/kWh] (7～9 月)
	14.69 [円/kWh] (その他の月)
C_{sell}	7.00 [円/kWh]
その他パラメータ	
$P_{\max}$	100 [kW]
η	0.95

その他のパラメータは、表3のように設定した。年間コスト試算のため、基本料金を表3のように設定した。1 [kW]

で 1,606[円]、そして契約電力 $P_{\max}$ を 100 [kW]とした。ケース別に契約電力は変化させておらず、年間の基本料金は $1,606 \times 100 \times 12$ [円]である。

そして、ケーススタディは表4のような4つの設備導入ケースを設定した。

表4 ケーススタディの設定

ケース	構成要素
ケース 1	駅負荷のみ
ケース 2	駅負荷 + PV
ケース 3	駅負荷 + PV + ESS
ケース 4	駅負荷 + PV + RP + ESS

3.4 ケーススタディの結果と考察

ケーススタディの結果を表5、6に示す。表5は年間の基本料金と目的関数の結果を基に、PV 発電電力の売電による利益も考慮した年間の運用コストを計算した結果である。ただし、設備導入コスト、メンテナンスコスト、人件費などは含まれていない。一方表6は、PV 発電電力の買取を考慮せず、年間の系統からの総購入電力量を計算した結果である。

表5より、PV、RP、ESSを併用したケース4は、何も導入しないケース1と比較して、年間約64[%]のコスト削減が可能であるという結果になった。また、表6の消費電力量より、ケース4はケース1と比較して約73[%]の省エネルギー化を実現できるという結果になった。

表5 ケーススタディ結果 コスト

ケース	年間運用コスト	減少額
ケース 1	11,746,603 [円]	基準値
ケース 2	7,305,965 [円]	−37.8 [%]
ケース 3	6,800,849 [円]	−42.1 [%]
ケース 4	4,195,815 [円]	−64.3 [%]

表6 ケーススタディ結果 系統からの購入電力量

ケース	年間購入電力量	減少量
ケース 1	656,558 [kWh]	基準値
ケース 2	403,629 [kWh]	−38.5 [%]
ケース 3	328,063 [kWh]	−50.0 [%]
ケース 4	174,498 [kWh]	−73.4 [%]

さらに、簡単ではあるが、例えば以下のように投資効果を概算できる。PV 1 [kW]の導入費用が20 [万円/kW]、ESS 1 [kWh]の導入費用が10 [万円/kWh]、RP 回収装置の導入価格が1台 5,000 [万円]であると仮定する。すると、諸条件よりケース4で必要な初期費用は16,000 [万円]である。表5より、ケース4における年間減少額は約750 [万円]と計算できるから、メンテナンスコストや交換費用などを無視して考えると、およそ20年で設備投資を回収できるという結論が得られる。上記の価格設定はあくまで一例だが、このような感度分析を繰り返す行うことにより、適切な設備投資の提案ができると考えている。

最後に、最適化により適切なエネルギーフローが得られていることを確認するため、計算結果例としてケース4におけるエネルギーフロー導出結果を次頁図3に示す。

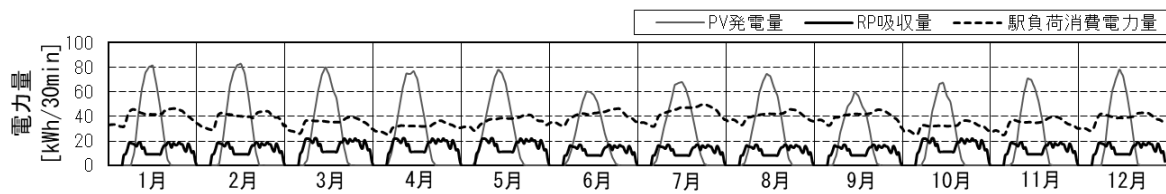


図2 ケーススタディで用いた月別平均電力量データ

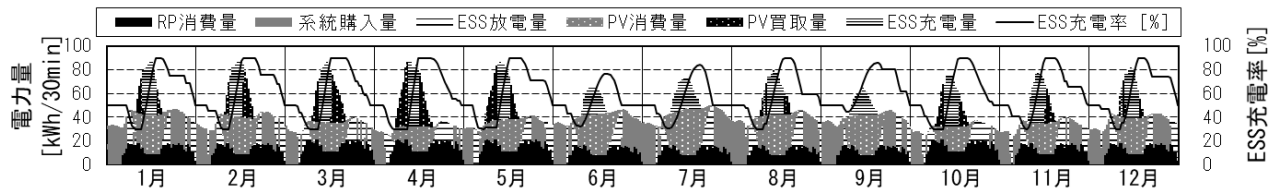


図3 ケース4のエネルギーフロー計算結果

図3から、最適化により、制約条件を満たしつつ各電源や負荷のエネルギーパターンに応じて、ESSの充放電量が適切に制御されるような解が導出されていることが分かる。また、吸収されたRPは30分単位でみればESSへ充電されず、駅負荷へそのまま使用されるような解となった。加えて、昼間時間帯で充電したPV発電量は朝夕の時間帯で負荷に放電されるような解となった。これらの解の特徴は実際の運用と比較して適切なものになっていると考えられる。

4. おわりに

4.1 本稿のまとめ

本稿では、PV、ESS、RPを併用する駅負荷を想定した新たな駅のモデル化を行い、その最適なエネルギーフローを求める問題をMILPとして定式化した。このモデル化と最適化手法を検証するため、ケーススタディを設定して小～中規模相当の仮想駅の年間コストや省エネルギー効果を試算した。その結果、PV、ESS、RPをすべて併用した場合、全く設備がない場合と比較して、年間で約64[%]のコスト削減効果と、約73[%]の省エネルギー効果を得られるという結果になった。本稿のモデル化と最適化手法により、PV、ESS、RPを併用する駅の年単位の省エネルギー効果、並びにコスト削減効果を試算できることが示された。

4.2 課題と今後の調査

今後は、今回の結果に加えて、設備コストや寿命などを考慮して最適な設備投資や運用方法を提案していく予定である。また、本稿はあくまでPV、ESS、RPを併用する駅が実現した場合の、30分ごとのエネルギーフローに基づく長期的なエネルギー戦略を考えたものであり、秒単位の制御方法は全く考慮していない。今回システムとして考えているPVやRPは、共に秒単位の変動が激しい電源である。その短期的変動の補償は系統に頼るのか、あるいはESSにその責務を負わせるのかなど、その影響を考慮する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 東京メトロ HP:「東西線ソーラー発電所」完成,
<https://www.tokymetro.jp/news/2015/677.html>
(2020年10月アクセス)
- 2) 林屋均:鉄道地上設備における電力貯蔵装置応用, 電気学会誌, 140巻4号, pp.217-220, 2020
- 3) 藤田敬喜:駅舎補助電源装置(S-EIV)の運用実績, 平成29年電気学会産業応用部門大会, 5-S8-5, 2017
- 4) 飯田浩平, 古谷勇真, 小川知行:環境・エネルギー分野の動向とグリーンイノベーション, Railway Research Review, Vol.72 No.6, pp.20-23, 2015
- 5) 渡邊信一, 瀧野俊明, 林屋均, 高木雅昭, 岩船由美子:駅におけるエネルギーマネジメントに関する研究, 平成23年電気学会産業応用部門大会, 3-49, 2011
- 6) Ibrahim Sengor, Hasan Can Kılıçkiran, Huseyin Akdemir, Bedri Kekezoğlu, Ozan Erdinc, Joao P. S. Catalao: "Energy Management of a Smart Railway Station Considering Regenerative Braking and Stochastic Behaviour of ESS and PV Generation", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol.9, Issue.3, pp.1041-1050, 2018
- 7) 赤井秀行, 宮武昌史:回生電力と再生可能エネルギーを併用した鉄道沿線施設の最適運用計画, 平成31年電気学会全国大会, 5-281, 2019
- 8) 齊藤里香, 林屋均, 松崎俊太郎, 宮川崇雅, 橋口英司, 上野秀幸, 中平雅士, 南之園弘太:鉄道配電線路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, pp.715-722, 2018
- 9) NEDO 日射に関するデータベース,
<https://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>
(2020年10月アクセス)
- 10) 東京電力 HP, 電気料金プラン一覧 高圧・特別高圧
https://www.tepco.co.jp/ep/corporate/plan_h/
(2020年10月アクセス)