

太陽光発電電力の自己消費率最大化のための電気自動車を用いた 学校・家庭のエネルギーマネジメント

永井 栄寿*, 藤田 稔之, 藤本 博志 (東京大学)
古井 秀治, 安田 善紀, 山際 昭雄 (ダイキン工業株式会社)

Energy Management using Electric Vehicle at School and Home
for Maximization of Self-consumption Rate of Photovoltaic Generator
Sakahisa Nagai, Toshiyuki Fujita, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)
Shuji Furui, Yoshiki Yasuda, Akio Yamagiwa (DAIKIN INDUSTRIES)

Photovoltaic generator (PV) and electric vehicles (EVs) have attracted much attention to solve environmental problems. This paper validates the charging/discharging effect of an EV battery and storage battery on the PV self-consumption rate. In addition, the effect of connecting thermal system to a DC bus for the reduction of the power conversion loss is quantitatively evaluated. As a simulation result, the self-consumption rate during spring and summer can be improved and the deficit power during winter can be reduced by using the EV battery.

キーワード：太陽光発電，電気自動車，エネルギーマネジメント，熱システム
(Photovoltaic generator, Electric vehicle, Energy management, Thermal system)

1. 序論

カーボンニュートラル社会の実現に向けた取り組みが国内外で活発に行われている。CO₂ ゼロエミッションの発電方法として、再生可能エネルギーが注目されており、我が国においては特に、太陽光発電 (PV: Photovoltaic generator) の導入割合が高く、2021 年度の発電実績では新エネルギー等発電の約 35% を占める⁽¹⁾。また、PV 発電電力の自己消費率の向上や、余剰電力および需要電力のピークの緩和、停電時の自立運転などを目的とした定置バッテリーと組み合わせたエネルギーシステムが注目されており、定置バッテリーの導入量も年々増加している⁽²⁾。PV と定置バッテリーを組み合わせたシステムの研究は、バッテリーの充放電制御⁽³⁾ や定置バッテリーの容量決定手法⁽⁴⁾ など盛んに行われている。

PV 自己消費率を上げる方法として、定置バッテリーを大量に導入する方法が簡単に考えられるが、設備投資や設置スペースの観点から好ましくない。そこで、近年普及率が増加している電気自動車 (EV: Electric Vehicle) のバッテリーストレージを利用する方法⁽⁵⁾⁽⁶⁾ やヒートポンプ給湯器 (HP: Heat pump) を使用して熱エネルギーに変換する方法が注目されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。文献(9)では、EV および HP の協調利用に関する研究が行われており、協調利用により PV の導入量を増やしても日中の余剰電力をマネジメントできることが示されている。

本研究では、PV、定置バッテリー、エアコン (A/C: Air Conditioner) や HP といった熱システム負荷、およびその他の負

荷がある学校および家庭のエネルギーシステムを取り扱う。シミュレーションでは、学校に勤務する教職員が EV を利用することを想定する。学校および家庭では EV の接続時間が異なるため、PV 自己消費率を上げるためには各バッテリーの充放電や HP の動作時間などを操作する必要がある。本稿では、EV の接続、各バッテリーの充放電優先度の変更、HP の動作時間シフトなどによりいかに PV 発電電力の自己消費率を上げるかを実負荷データを使用したシミュレーションにより検証する。また、自己消費率以外の評価指標として、余剰電力および需要電力、各バッテリーの SoC 最大時間および最小時間を示し、カーボンニュートラル実現に向けた系統とのやり取り電力量やバッテリーの利用率を評価する。先行研究では、自己消費率や自給率をいかに改善するかを評価しているが、著者が知る限りバッテリーの利用率も評価している研究はない。また、システムの高効率運転を目的とした、熱システムの DC 接続化に関する検討も行い、各電力変換器で発生する電力ロスを計算し、有効性を示す。

2. 対象モデル

Fig. 1 に本稿で対象とする学校および家庭の電力機器の接続モデルを示す。家庭では、PV、DCDC コンバータ、定置バッテリー、EV 用ワイヤレス充電器 (WPT Charger: Wireless Power Transfer Charger)、EV、パワーコンディショナ (PC: Power Conditioner)、HP、A/C、その他の負荷があり、学校は家庭のシステムと比べて HP が無い。E および η はそれぞれ機器の入出力電力量および電力変換効率を表す。E_{grid} は系

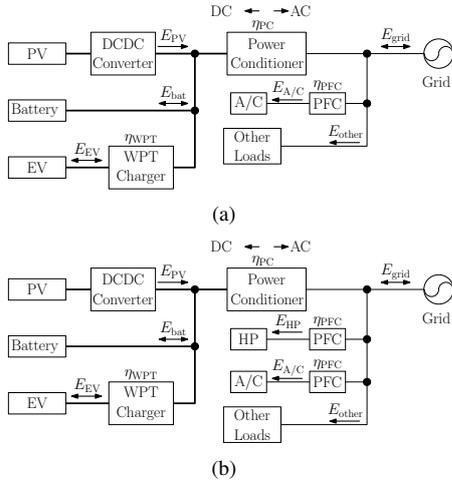


図1 電力機器の接続モデル (a) 学校 (b) 家庭

Fig. 1. Connection of electric devices and converters. (a) At school. (b) At home.

統とのやり取り電力量を表し、系統へ流れる方向（余剰電力出力方向）を正とする。定置バッテリー充放電電力量 E_{bat} および EV への充放電電力量 E_{EV} は充電方向を正とする。HP および A/C などの熱システムは一般的に交流側に接続され、内部には整流するための PFC および圧縮機などを動かすインバータなどが内蔵されている。本稿では、定置バッテリーおよび EV バッテリーの充放電、家庭における HP の動作時間に着目し、PV 発電電力の自己消費率を最大化するための運転方法に関してシミュレーションで検証する。また、熱システムの DC 接続化による電力変換ロス低減効果も検証する。

シミュレーションでは、PV は出力抑制をせず、(1) 式で発電電力量 E_{PV} [kWh] を計算する⁽¹⁰⁾。

$$E_{PV} = K_H K_j I P_{PV} \quad (1)$$

K_H , K_j , I , P_{PV} はそれぞれ調整係数、受光面の汚れや DCDC コンバータなどの回路損失による損失係数、全天日射量 [kWh/m²], PV 容量 [kW] を表す。調整係数は文献(10)に記載されている Table 1 の値を用いる。電力のつり合い式は(2)式で表される。

$$E_{grid} = \eta_{PC} \left(E_{PV} - E_{bat} - \frac{E_{EV}}{\eta_{WPT}} \right) - \frac{E_{A/C} + E_{HP}}{\eta_{PFC}} - E_{other} \quad (2)$$

PV 自己消費率 R はいかに PV 発電電力を建物内で消費するかの割合であり、(3)式で定義される。

$$R = \frac{\sum (E_{PV} - E_{grid} (E_{grid} > 0))}{\sum E_{PV}} \quad (3)$$

本稿では、PV 自己消費率、系統との電力やり取り量（余剰電力および需要電力）、バッテリー SoC 最大時間および最小時間を評価指標とする。

3. シミュレーション

〈3・1〉 条件 本節では、シミュレーションで使

表1 (1) 式における調整係数

Table 1. Adjustment coefficient in (1).

Month	Value
Jan.–Mar.	0.90
Apr.–May	0.85
Jun.–Sep.	0.80
Oct.–Nov.	0.85
Dec.	0.90

表2 シミュレーションパラメータ
Table 2. Parameters used in simulations.

Parameter	Value
Storage battery capacity at home	6 kWh
Storage battery capacity at school	500 kWh
EV battery capacity	40 kWh
PV capacity at home	4 kW
PV capacity at school	164.48 kW
HP capacity	4.5 kW
Loss coefficient of PV K_j	0.95
Efficiency of PC	0.97
Efficiency of WPT charger	0.95
Efficiency of PFC	0.975

パラメータおよび条件を説明する。Table 2 にパラメータをまとめる。学校の PV 容量は年間消費電力量と年間発電電力量が釣り合う値とする。つまり、十分な蓄電設備があれば、余剰電力は発生しない。家庭の負荷データは文献(11)を基に計算したものを使用し、学校は実負荷データを使用する。PV 発電電力量 E_{PV} の計算で使用する全天日射量は NEDO 年間時刻別日射量データベース⁽¹²⁾ から取得した。その他の条件を以下にまとめる。

- シミュレーションは 4 月 1 日 0 時 0 分から始め、1 年間を通して行う。時間の粒度は 30 分である。
- 定置バッテリーの SoC の初期値は半分とする。
- EV は出勤・帰宅用の走行電力として最低 10 % の SoC を確保する。
- 学校到着時および家庭到着時の EV バッテリー SoC は PV 発電電力と線形の関係を持つとする。
- EV が接続されているとき、充電は定置バッテリー、放電は EV バッテリーを優先する。

学校および家庭のシミュレーションは別々に実施しているため、EV の SoC に連続性はない。しかしながら、EV の SoC は到着地で充放電を実施することを想定する。学校および家庭はどちらも PV を導入しているため、SoC は PV 発電電力量に相関を持つため、条件 d を設定する。条件 e の設定理由は次節に記述する。

〈3・2〉 EV の接続による効果 本節では、学校および

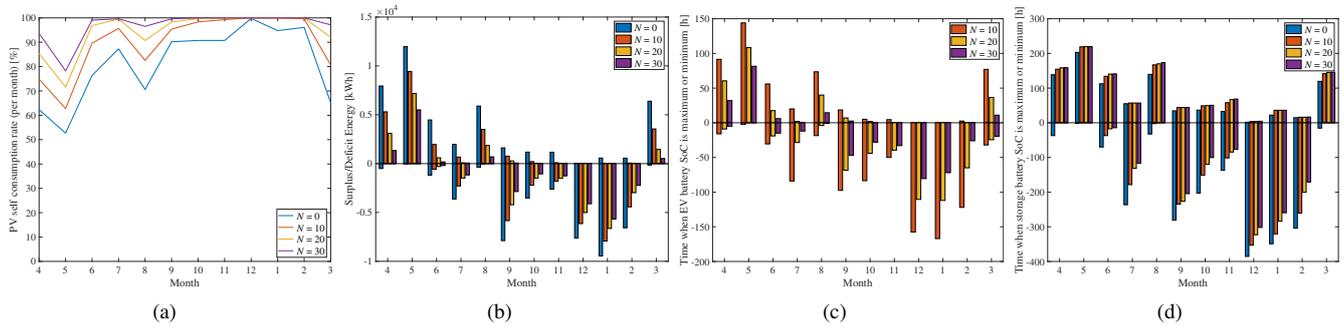


図2 学校におけるEV接続効果 (a) PV自己消費率 (b) 余剰電力量および需要電力量 (c) EVバッテリーのSoC最大時間および最小時間 (d) 定置バッテリーのSoC最大時間および最小時間

Fig. 2. Effect of connecting EVs to system at school. (a) PV self-consumption rate. (b) Surplus/Deficit energy. (c) Time when EV battery SoC is maximum or minimum. (d) Time when storage battery SoC is maximum or minimum.

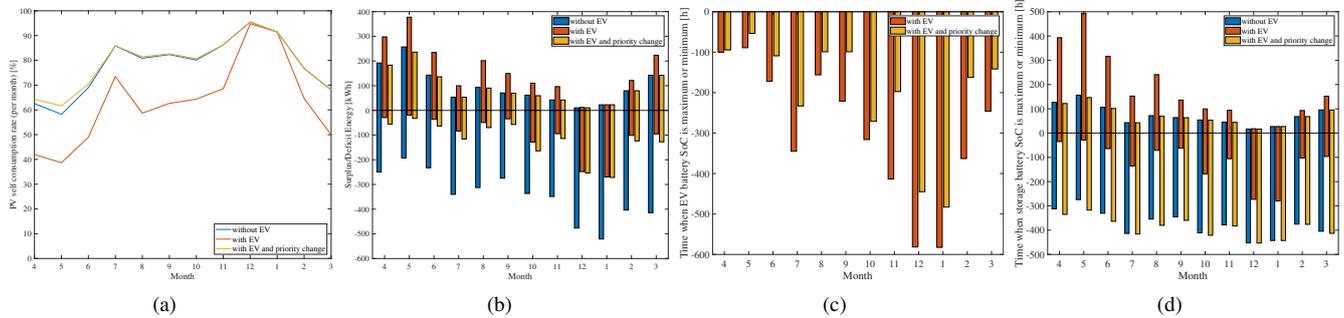


図3 家庭におけるEV接続効果 (a) PV自己消費率 (b) 余剰電力量および需要電力量 (c) EVバッテリーのSoC最大時間および最小時間 (d) 定置バッテリーのSoC最大時間および最小時間

Fig. 3. Effect of connecting EVs to system at home. (a) PV self-consumption rate. (b) Surplus/Deficit energy. (c) Time when EV battery SoC is maximum or minimum. (d) Time when storage battery SoC is maximum or minimum.

表3 学校および家庭のEV接続台数および時間⁽¹³⁾

Table 3. Numbers of EVs and period when they are connected to WPT charger at school and home⁽¹³⁾.

	Number of EVs		Connected time	
	N		Weekday	Saturday and Sunday
School	$0 \leq N \leq 30$		8–18	10.5–18
Home	1		0–7.5, 18.5–24	0–10, 18.5–24

家庭における電力システムにEVが接続されることによる自己消費率改善効果を示す。学校および家庭に接続されるEVの台数および接続タイミングの各条件をTable 3にまとめる。接続タイミング条件は総務省統計局の社会生活基本調査の文献(13)を基に設定した。

Fig. 2に学校におけるシミュレーション結果を示す。Fig. 2(a)は月ごとのPV自己消費率を表し、(b)は月ごとの余剰電力出力量を正の値として表し、不足した需要電力量を負の値で表し、(c)および(d)はEVバッテリーおよび定置バッテリーのSoC最大時間を正の値で表し、最小時間を負の値で表している。EV接続台数の増加により、PVの余剰電力をEVバッテリーに充電することが可能になるため、余剰電力を低減することが可能になり、結果としてPV自己消費率が改善される。特に、PV発電電力量が多い4–9月に

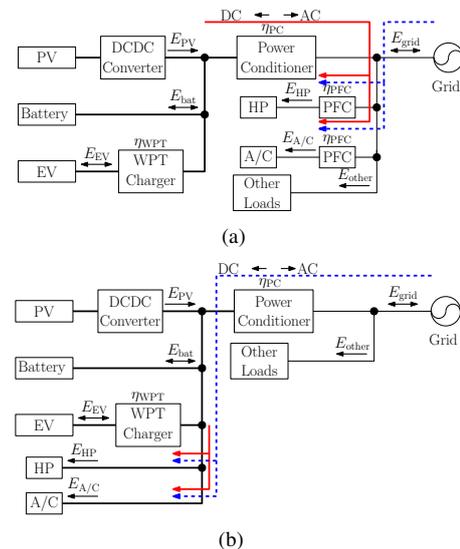


図4 家庭における熱システムへの電力供給経路 (a) DC接続前 (b) DC接続後

Fig. 4. Power supply path to thermal system at home. (a) Before DC connection. (b) After DC connection.

において、PV自己消費率が改善されていることが確認でき、EV20台ほどで4–5月を除く月において90%を超えている。

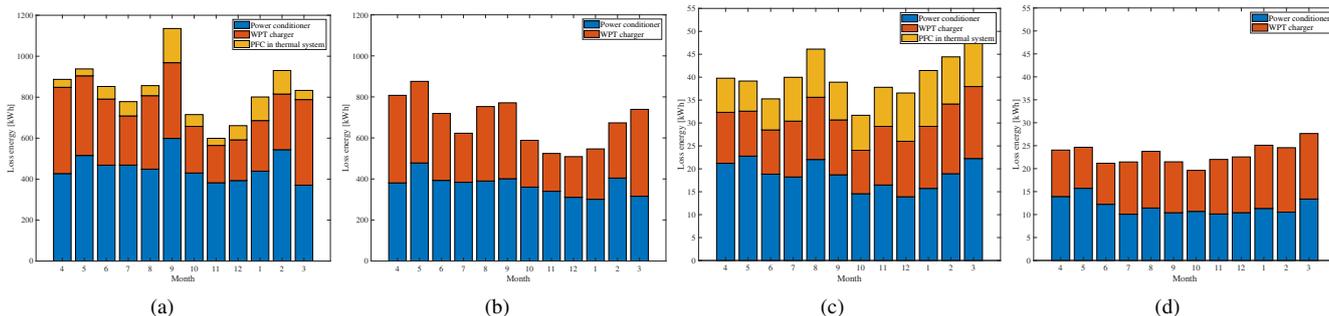


図5 熱システムのDC接続による電力変換器ロス削減効果 (a) DC接続前(学校) (b) DC接続後(学校) (c) DC接続前(家庭) (d) DC接続後(家庭)

Fig. 5. Loss reduction effect by connecting thermal system to DC bus. (a) Before DC connection at school. (b) After DC connection at school. (c) Before DC connection at home. (d) After DC connection at home.

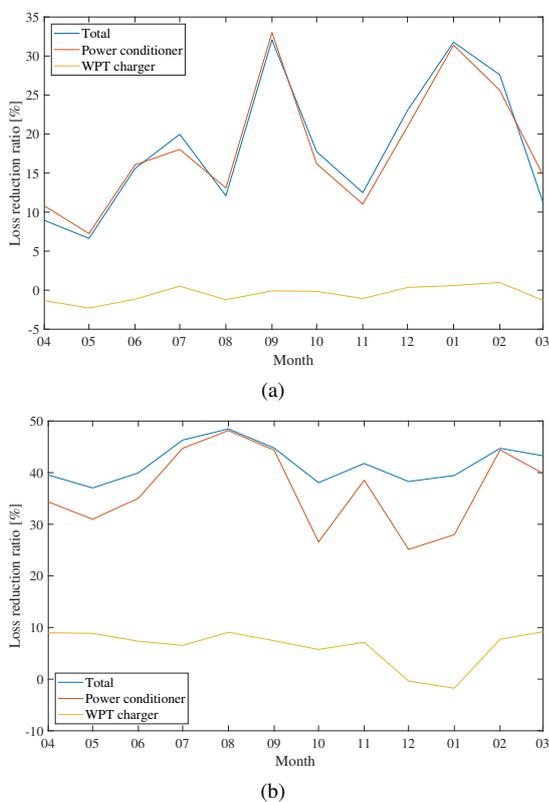


図6 各電力変換器の電力変換ロス削減率 (a) 学校 (b) 家庭
Fig. 6. Loss reduction ratio of each power converter. (a) At school. (b) At home.

EV接続前に12-2月の自己消費率が高い理由は、PV発電電力量が小さく、需要電力が大きいため、発電電力をそのまま使用しているからである。また、PV発電電力量で賄えない需要電力量をEVバッテリーから供給することが可能となるため、見かけ上の需要電力量も低減することが可能になる。EVバッテリーおよび定置バッテリーのSoC最大時間および最小時間はいかに各バッテリーを有効に活用できているかという指標であり、各時間が短いほどバッテリーが有効に活

用できていることを示す。つまり、EV接続台数の増加により、EVバッテリーの有効活用だけでなく、定置バッテリーも有効活用されていることが確認できる。

次に家庭におけるシミュレーション結果をFig. 3に示す。(a) (d)の各図はFig. 2と同じである。EVが接続されていない結果を青、接続されている結果を橙で示している。PV自己消費率について、EVを接続することにより、悪化していることが確認でき、余剰電力も増加していることがわかる。家庭ではEVの接続時間がTable 3に示すとおり、PVの発電が少ない夜間である。放電優先度は条件eに示すように、EVバッテリーを優先的に放電するため、夜間で定置バッテリーに蓄電されたエネルギーはあまり使用されない。つまり、定置バッテリーSoCが高い状態で次の日を迎えることになり、日中はEVが存在しないため、PV発電電力を蓄えるストレージがなく、結果として系統に余剰電力として出力する。そこで、充放電優先度を逆に変えた場合のシミュレーション結果を同図の黄で示す。PV自己消費率はわずかであるが、改善されていることが確認できる。また、EVに蓄電されているエネルギーを夜間に使用することが可能になるため、Fig. 2(b)からわかるとおり、需要電力が低減されていることが確認できる。EVバッテリーSoC最大時間に関して、EVは夜間に接続されるため、PV発電電力が小さく、SoCが最大の状態になることはない。最小時間は充放電優先度を変えることで低減することができ、EVバッテリーを有効活用できていることが確認できる。定置バッテリーSoC最大時間は充放電優先度の変更によりわずかに改善されたが、SoC最小時間は悪化した。

充放電優先度に関して、次節以降は、学校は条件e、家庭は条件eの逆の優先度としてシミュレーションを実施する。

〈3・3〉 熱システムのDC接続による電力変換器ロス削減効果

本節では、学校および家庭において熱システムのDC接続による電力変換器ロス削減効果を示す。学校はEV30台が接続されることとし、Fig. 1において、学校では

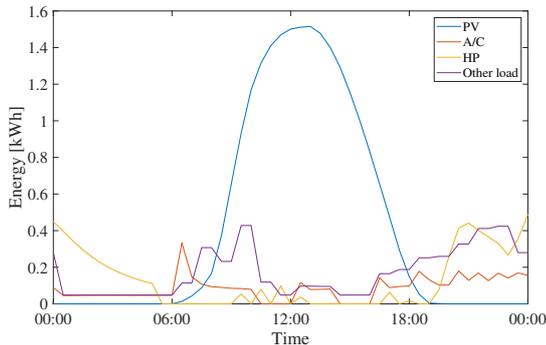


図7 PV 発電電力量と需要電力量の波形例

Fig. 7. Example waveforms of PV generated energy and demand energy at home.

A/C を、家庭では A/C および HP を DC 側に接続する。熱システムへの電力供給経路を考えると、DC 側および AC 側から Fig. 4 に示す 2 つの経路がある。DC 接続前では、DC 側からの経路はパワーコンディショナおよび PFC を通り、AC 側からの経路は PFC を通る。PV 発電電力を有効に使用したいため、DC 側からの電力供給が多いシステムにおいては、常にパワーコンディショナおよび PFC による電力ロスが生じる。一方、DC 接続後は DC 側からの経路は電力変換器がなく、AC 側からの経路はパワーコンディショナを通る。つまり、熱システムの DC 接続により、PFC による電力変換ロスをゼロにすることができ、さらにパワーコンディショナの電力変換ロス低減効果も見込める。

熱システムの DC 接続前後におけるパワーコンディショナ、WPT 充電器、PFC のそれぞれの電力変換ロスのシミュレーション結果を Fig. 5 に示す。学校および家庭のどちらも PFC の電力変換ロスを DC 接続によりゼロにでき、また、パワーコンディショナの電力変換ロスも低減されていることがわかる。特に、熱システムの利用率が大きい家庭においては DC 接続の効果が大きいことがわかる。DC 接続前後の電力変換ロス低減率を Fig. 6 に示す。EV 用 WPT 充電器の電力変換ロス低減率は数%程度であり、DC 接続による効果はあまりない。一方、パワーコンディショナの電力変換ロス低減率は学校では最大 33%、家庭では最大 48%であり、DC 接続による効果が大きいことがわかる。特に、熱システムの利用率の高い、夏季 (7-9 月) および冬季 (12-2 月) の削減効果が高い。以上のことから、熱システムの DC 接続により PV の発電電力を電力変換器のロスで無駄に消費されることなく、より有効に活用できることが見込める。

〈3・4〉 家庭におけるヒートポンプ給湯器の動作時間シフトによる効果 本節では、HP の動作時間シフトによる PV 自己消費率改善効果に関して記述する。家庭におけるある 1 日の需要電力および PV 発電電力を Fig. 7 に示す。日中は PV 発電電力量が大きい反面、家庭内にいる人が少なく、

A/C、HP、およびその他の需要電力量が小さい。そのため、PV 自己消費率を上げるためには、定置バッテリーや EV バッテリーなどに蓄電し、夜間に使用する必要がある。しかしながら、日中は EV が出かけているため、定置バッテリーしか使用することができず、満充電になったとき、余剰電力は系統に流れる。大容量の定置バッテリーの設置は、利用者の負担が増えるため好ましくなく、結果として PV の出力抑制が必要となり、発電電力を有効に利用できなくなる。

そこで、HP の動作時間に着目する。HP は電気料金が安い夜間に運転しているため、他の負荷同様に日中の PV 発電電力量が大きい時間はほとんど動作していない。この運転方法は PV などを導入しない一般家庭をモデルにした需要曲線であるが、PV の自己消費率という観点では、PV 発電電力の小さい夜間で利用することは好ましくない。そこで、HP の動作時間をシフトさせることを検討する。Fig. 8 は HP の動作時間を 6、12、18 時間シフトさせたときの PV 自己消費率、余剰電力量および需要電力量、各バッテリーの SoC 最大時間および最小時間を示す。Fig. 8(a) から、HP の動作時間を 12 時間シフトすることにより PV 自己消費率が大幅に改善され、特に PV 発電電力量の大きい春～夏 (4-9 月) において約 20% の改善が見込める。これは、Fig. 8(b) の余剰電力量や (c) および (d) の EV バッテリーおよび定置バッテリーの SoC 最大時間および最小時間からも確認できる。一方で、不足電力量が悪化していることも確認できる。これは、雨天や秋～冬の PV 発電電力量が小さい期間において、日中の PV 発電電力が HP の需要電力で消費され、定置バッテリーを十分に蓄電できず夜間を迎えて電力が不足するためであると考えられる。改善案として、季節ごとに HP 動作時間シフト量を変動させることが考えられる。

4. 結論

本稿では、学校および家庭に導入された PV の自己消費率を最大化するべく、定置バッテリーおよび EV バッテリーの充放電、熱システムの動作時間シフトの効果を年間実負荷データを用いてシミュレーションにより検証した。学校では、EV 接続台数を増やすほど自己消費率が改善され、系統からの需要電力量も改善されることが確認された。また、各バッテリーの SoC 最大時間および最小時間から、EV 台数を増やすことにより定置バッテリーの SoC 最大時間以外の時間が低減されており、バッテリーが有効に使用されていることが確認された。家庭では、EV の接続時間と PV 発電電力発生時間がずれているため、学校と同じバッテリー充放電優先度では自己消費率が悪化することが確認され、充放電優先度を逆にすることで解消できることを示した。また、家庭においても各バッテリーの利用率が改善されることが確認された。HP の動作時間シフトに関しても、12 時間動作時間をシフトさせ PV 発電電力発生時間と HP の動作時間を合わ

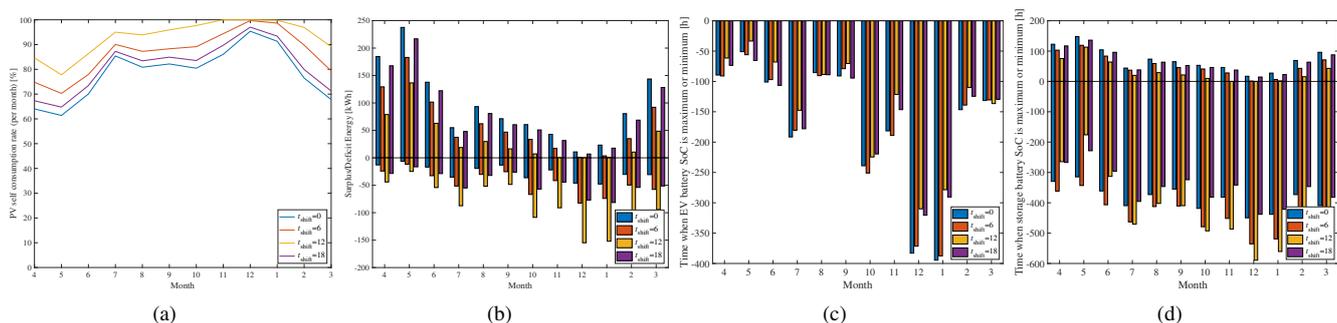


図8 家庭におけるHP動作時間シフト効果 (a) PV自己消費率 (b) 余剰電力量および需要電力量 (c) EVバッテリーのSoC最大時間および最小時間 (d) 定置バッテリーのSoC最大時間および最小時間

Fig. 8. Effect of HP operating time shift to system at home. (a) PV self-consumption rate. (b) Surplus/Deficit energy. (c) Time when EV battery SoC is maximum or minimum. (d) Time when storage battery SoC is maximum or minimum.

せることでPV自己消費率が改善可能であることを示した。

熱システムのDC接続化による電力変換器ロスの低減効果についてもシミュレーションにより検証した。学校および家庭のどちらにおいてもPFCによる電力変換ロスをゼロにする効果およびパワーコンディショナで発生する電力変換ロスを低減することが示され、特に熱システムの利用率の高い夏季および冬季に効果的であることを示した。

文 献

- (1) Agency for Natural Resources and Energy, Statistics of Electric Power (2021) (in Japanese), 経済産業省 資源エネルギー庁, 2021年度電力調査統計表, https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/results_archive.html#r03 (閲覧 2022/12/14)
- (2) 一般社団法人 日本電機工業会, JEMA 蓄電システム自主統計 2021年度出荷実績, https://www.jema-net.or.jp/Japanese/data/jisyu/lib_outline.html (閲覧 2022/12/14)
- (3) V. Gevorgian, P. Koralewicz, S. Shah, E. Mendiola, R. Wallen, and H. V. Pico, "Photovoltaic plant and battery energy storage system integration at NREL's Flatirons campus." *Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory*, NREL/TP-5D00-81104 (2022)
- (4) P. Chayarun, K. Kawabe, and T. Nanahara, "Determination of optimal battery energy storage system capacity for commercial electricity consumers with photovoltaic systems by integrating battery aging and PV forecast uncertainty." *IEEJ Trans. Elec. Electron. Eng.*, vol. 16, pp. 226–237, (2021)
- (5) F. Giordano, A. Ciocia, P. D. Leo, A. Mazza, F. Spertino, A. Tencioni, and S. Vaschetto, "Vehicle-to-home usage scenarios for self-consumption improvement of a residential prosumer with photovoltaic roof," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 3, pp. 2945–2956 (2020)
- (6) R. Fachrizal and J. Munkhammar, "Improved photovoltaic self-consumption in residential buildings with distributed and centralized smart charging of electric vehicle." *Energies*, vol. 13, no. 1153, pp. 1–19 (2020)
- (7) Y. Iwafune, J. Kanamori, H. Sakakibara, "A comparison of the effects of energy management using heat pump water heaters and batteries in photovoltaic-installed houses," *Energy Conversion and Management*, vol. 148, pp. 146–160 (2017)
- (8) H. Gong, V. Rallabandi, M. L. McIntyre, E. Hossain, and D. M. Ionel, "Peak reduction and long term load forecasting for large residential communities including smart homes with energy storage," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 19345–19355 (2021)
- (9) G. Stamatellos, O. Zogou, and A. Stamatelos, "Interaction of a house's rooftop PV system with an electric vehicle's battery storage and air source heat pump," *Solar*, vol. 2, pp. 186–214 (2022)
- (10) Japan Photovoltaic Energy Association, Display guideline (2022) (in Japanese) 太陽光発電協会, 表示ガイドライン, <https://www.jpea.gr.jp/document/handout/#guide> (閲覧 2022/12/14)
- (11) 財団法人 建築環境・省エネルギー機構, 住宅事業建築主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説 (2017)
- (12) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 年間時別日射量データベース (METPV-11), <https://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html> (閲覧 2022/12/14)
- (13) 総務省統計局, 令和3年社会生活基本調査 (曜日, 男女, 配偶関係, ふだんの就業状態, 行動の種類, 時刻区分別行動者率 (15歳以上) - 全国, 11大都市圏・11大都市圏以外, 都市階級), <https://www.stat.go.jp/data/shakai/2021/index.html> (閲覧 2022/12/14)