

太陽光発電・空調機・給湯器・電気自動車の  
連携制御による直流接続型家庭用エネルギーマネジメントシステム

藤田稔之\*† 永井栄寿\* 藤本博志\* 中川倫博\*\* 山下尚也\*\* 古井秀治\*\* 安田善紀\*\* 山際昭雄\*\*

\* 東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻  
(277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)\*\* ダイキン工業株式会社テクノロジー・イノベーションセンター  
(566-8585 大阪府摂津市西一津屋 1-1)

## 要約

カーボンニュートラル社会実現に向けて様々な分野で取り組みが行われている。省エネルギー化技術の一つとしてエネルギーマネジメントシステムが注目されている。本論文では、太陽電池と定置バッテリーを含むシステムの直流部に空調機・給湯器を接続し、電力変換システムにおける損失電力の低減およびエネルギーマネジメントによる太陽光発電電力の有効活用手法を提案する。実験機を構成し良好に動作することを確認し、直流電圧を制御することで空調機の COP の向上の可能性を示した。また、年間を通したシミュレーションにより、直流接続化によってシステム損失が 40%低減することを確認し、ヒートポンプ給湯器の動作を日中にシフトすることで発電電力を有効活用できることを確認した。

キーワード: 住宅, 省エネルギー, 空気調和機, エネルギーマネジメントシステム, 連携制御

## 1. 緒言

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。CO<sub>2</sub>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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>。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<sup>3)</sup>や定置バッテリーの容量決定手法<sup>4)</sup>など盛んに行われている。余剰電力および需要電力のピークの緩和を示す指標として PV 自己消費率がある。定置バッテリーを大量に導入することで自己消費率を向上することが考えられるが、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<sup>5,6)</sup>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<sup>7,8)</sup>。特に家庭における空調機等に消費される電力の消費割合はおよそ 35%程度であり<sup>9)</sup>、熱エネルギー変換の際の変換器の損失は無視できない。文献<sup>10)</sup>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。また、ユーザの目線から日本卸電力取引所の価格に連動して EV の充放電戦略を決定する手段についても提案されている<sup>11)</sup>。

本論文では、PV・定置バッテリー・空調機 (A/C: Air Conditioner) や HP といった冷凍空調システム、およびその他の負荷がある家庭のエネルギーマネジメントシステム (HEMS) を提案する。システムの高効率運転を目的として PV の電力を最大限利用し、空調等の変換器の損失を最小

†Fax:+81 4-7136-3881 E-mail:t-fujita@edu.k.u-tokyo.ac.jp

Paper presented at Joint Technical Meeting on “Motor Drive”, “Home and Consumer Appliances” IEE Japan, March 1st, 2023, Tokyo, Japan

and Joint Technical Meeting on “Power Engineering”, “Power System Engineering”, “Semiconductor Power Converter” IEE Japan, March 6th-7th, 2023, Tokyo, Japan

に抑えるために、それぞれの負荷を直流に接続する。直流に接続されているため複数の変換器や負荷を並列に接続して拡張することが容易であることを特徴としている。

はじめに基本的な構成として PV、定置バッテリー、A/C、系統連系インバータの 4 つの変換器を直流に接続したベンチシステムを構築した。基礎評価として一般的なフィードバック (FB) 制御を実装した場合のシステムの特性を評価し、本提案システムが安定に動作可能であることを示す。また、直流リンクの電圧を変更することで A/C のモータインバータの高効率な動作によるシステム損失低減について検証を行うことで有効性についても検証する。

さらに、提案システムが年間にわたって動作した際の各電力変換器で発生する損失についても評価を行う。さらに、導入するユーザ側のメリットだけではなく、PV 導入による余剰電力や需要電力の変動が系統電源へ与える影響を同時に評価が可能な自己消費率という評価指標を用いて評価を行った。HP の運転時間をシフトすることで PV 発電電力の自己消費率の向上の可能性をシミュレーションにより検証する。その他の評価指標として、余剰電力および需要電力、各バッテリーの SoC 最大および最小時間を示し、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。

## 2. システム構成

### 2.1 提案システム

Fig. 1 に提案するエネルギーシステムについて示す。従来では、家庭内で大電力を扱う家電機器等は個別に管理されており、それぞれが独立に制御を行っている。HEMS は家庭内で電気を使用している機器について、一定期間の使用量や稼働状況を把握し、電力使用の最適化を図るための仕組みである。具体的には、それぞれ個別の家庭内機器と電力計を通信によって接続し、個別の機器を制御することである。本論文では家庭内で比較的大きな電力を扱う機器を一つにまとめ、一体として制御が可能となるシステムを提案する。各機器の電流電圧情報を遅延なく取得することが可能となるため、全体最適

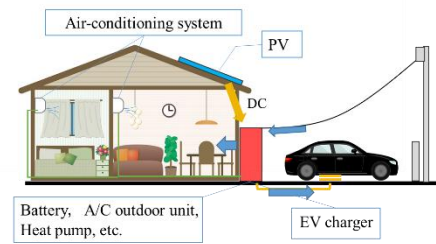
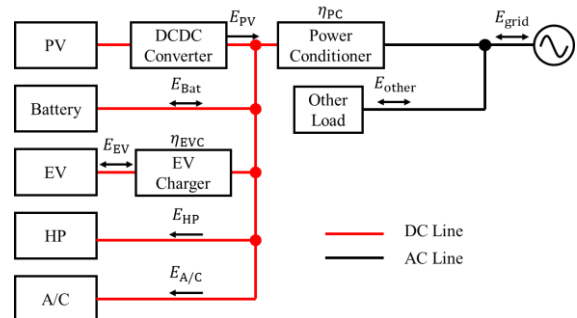
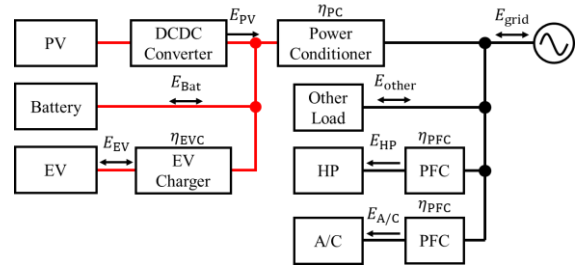


Fig. 1 Proposed Energy system connected residential devices.



(a) Proposed system



(b) Conventional system

Fig. 2 Schematic connection of electric devices and converters.

を目指した制御、停電時の連続稼働、PV の発電電力が小さい場合でも損失が少なくなるため、電力を有効に活用できる。さらに今後普及が期待される EV バッテリーを積極的に活用することによって設備コストや設置スペースの低減が可能となる。

Fig. 2 に本論文で対象とする家庭の電力機器の接続モデルについて示す。家庭では、PV、DCDC コンバータ、定置バッテリー、EV 用充電器 (EV Charger)、EV、パワーコンディショナ (PC: Power Conditioner)、HP、A/C、その他の家庭内負荷がある。Fig. 2(b)に示すように A/C や HP などの冷凍空調システムは一般的に交流 (AC :

Alternative Current) 側に接続され、内部には整流するための力率改善整流器 (PFC: Power Factor Corrector) および圧縮機およびファンモータを動かすモータインバータがそれぞれ内蔵されている。 Fig. 2(a)は提案するエネルギーシステムは PFC を介さずに直流に接続し、各システムと共用化することによって変換器の損失を減らすことが可能となるシステムである。

### 3. ベンチシステムによる動作検証

#### 3.1 主回路および制御構成

Fig. 3 に本論文で提案するベンチシステムの主回路の回路図を示す。提案する本装置は最小構成であり、発電部である PV と、発電した電力を貯蔵する Battery、PC の基本機能である系統連系インバータ、および A/C を接続している。それぞれの変換器部の出力は  $C_{link}$  に接続されている。PV コンバータ (PV-con.) は、一般的な降圧コンバータ、Battery コンバータ (B-con.) は昇圧コンバータとした。B-con. は選定した SiC-MOSFET の電流制限のため、2 相のインターリーブ方式とした。系統連系インバータ (G-inv.) は、系統に接続されるフィルタを用いて、フルブリッジコンバータによって構成した。PV-con. の入力電源は、PV カーブが模擬可能な DC 電源である。B-con. に接続される Battery は双方向 DC 電源によってバッテリーを模擬した。G-inv. の系統側についても、直接系統に接続せずに、基本特性の確認及び安全のため双方向の系統模擬電源装置を用いた。A/C については、ダイキン製品番号 : S40ZTAXP-W を使用している。また、製品

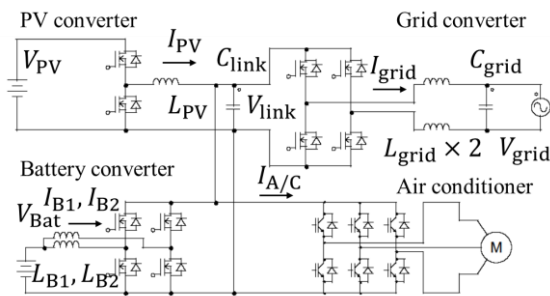


Fig. 3 Main circuit diagram of the proposed bench system.

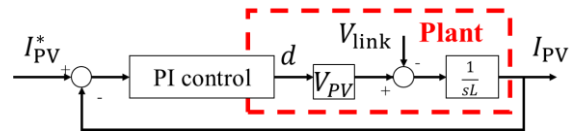


Fig. 4 Block control diagrams of PV converter.

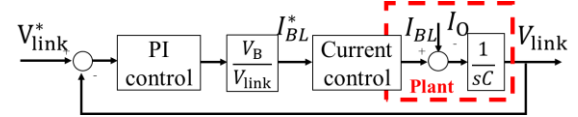


Fig. 5 Block control diagrams of battery converter.

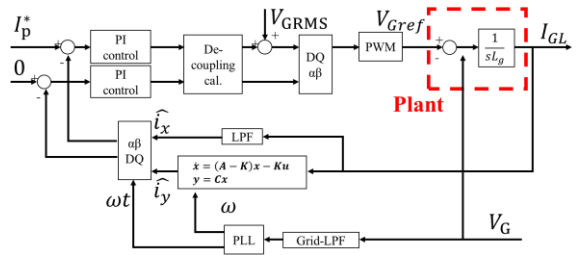


Fig. 6 Block control diagrams of grid inverter.

を改造し電源入力を AC 200V から DC 300 V となるように回路を変更して  $C_{link}$  に接続した。

Fig. 4 は、PV-con. の制御を示しており、一般的な PI 電流制御を使用している。ゲインは、重根極配置となる値に設定した。

Fig. 5 は、B-con. による DC リンク電圧の制御を示しており、インナーループに電流制御を実装している。電流制御は Fig. 4 に示す制御と同一の構成となっている。電流制御指令値にはリミッタを設けており、本論文においては、40 A とした。明示的に示してはいないが、それぞれの変換器の Duty 比の制御指令値  $d$  は、 $0 \leq d \leq 1$  のリミッタを実装した。

Fig. 6 は、G-inv. による系統電流の制御を表している。本論文においては、DQ 変換による有効電流と無効電流をそれぞれ PI 制御によって制御を行っている。無効電流については、0 A 指令として力率 1 制御を本論文では行っている。位相は、系統電圧を PLL (Phase Locked Loop) 制御によって取得している。測定は提案回路のオンボードセンサによって値を取得しており、センサの値のノイズの低減を行うため、PLL を行う前にローパスフィルタを  $V_{grid}$  に行っている。単相

系統連系インバータの DQ 座標における制御には、位相が 90 度ずれた瞬時値を生成する必要がある<sup>12)</sup>。本論文においては、電流オブザーバを用いて生成した。電流オブザーバは以下のように記述される。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \hat{i}_x \\ \hat{i}_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_x & -\omega \\ \omega + k_y & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{i}_x \\ \hat{i}_y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \end{pmatrix} i_{\text{grid}} \quad (2)$$

また、G-inv.の電流制御にはデッドタイム補償を行っている。

以上の制御をキャリア周期で離散化を行い、PE-Expert4 の実験用汎用制御器に実装しベンチシステムの評価を行った。A/C の改造は圧縮機モータの制御については変更を行っていない。

Fig. 7 に実験で使用したベンチシステムを示

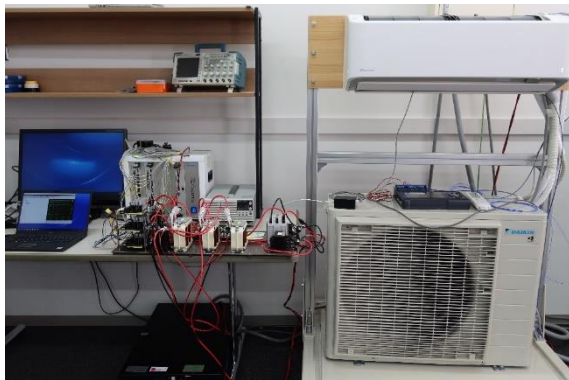


Fig. 7 Photo of the proposed test bench system.

Table 1 Experimental parameters of the bench.

Parameter	Value	Parameter	Value
$f_c$	20 kHz	$C_{\text{grid}}$	20 $\mu\text{F}$
$G_{\text{PPV}}$	4.8	$L_{\text{PV}}$	1.2 mH
$G_{\text{IPV}}$	1 kHz	$L_{\text{B1}}, L_{\text{B2}}$	450 $\mu\text{H}$
$G_{\text{Pbat}}$	3.5	$L_{\text{grid}}$	440 $\mu\text{H}$
$G_{\text{Pbat}}$	2 kHz	$V_{\text{PV}}$	400 V
$K_{\text{Pbat}}$	3.5	$V_{\text{bat}}$	200 V
$K_{\text{Ibat}}$	857 Hz	$V_{\text{grid}}$	200 Vrms
$G_{\text{Pgrid}}$	2.0	$V_{\text{link}}^*$	240-320 V
$G_{\text{Igrid}}$	500 Hz	$I_{\text{PV}}^*$	1.2, 2 A
$V_{\text{grid LPF}}$	8 kHz	$I_{\text{grid}}^*$	4 Arms
$I_{\text{grid LPF}}$	4 kHz	Dead time	500 ns
$k$	4 kHz		

す。A/C は、環境温度を含めた温湿度の測定を行っている。吸気口および排気口部において、室内機の温度を測定している。また、Table 1 に本実験における回路素子および、制御パラメータを示す。これらの条件を用い、各コンバータの制御指令値を変更することによって本提案システムの実証を行った。

### 3.2 DC 電圧変更による A/C の高効率化

A/C の入力 DC 電圧を変更し、A/C の効率変化を実験により計測した。A/C の動作中は温湿度および A/C 内の圧縮機（モータ）の回転数の計測を行った。温湿度は K 熱電対および、HIOKI 製湿度センサ Z2000 を使用して 1 秒間隔で測定を行った。 $V_{\text{link}}^*$  は初期条件を 240 V とし、適切なタイミングで指令値を変更し、A/C の入力電流電圧特性を測定した。また、 $V_{\text{link}}$  の有効利用範囲を拡大するために、 $V_{\text{grid}}$  は 0 として、基礎特性について測定を行った。その他の指令値については、Table 1 と同一である。A/C は 0 秒時にリモコンによって冷房動作を行い、設定温度を 18°C とした。A/C 以外の 3 つの変換器は、A/C 動作の直前に動作を開始している。A/C は 2500 秒間運転を行った後、リモコンから停止指令を出し、停止させた。A/C 以外の変換器については、A/C 停止後、600 秒後に運転を停止した。

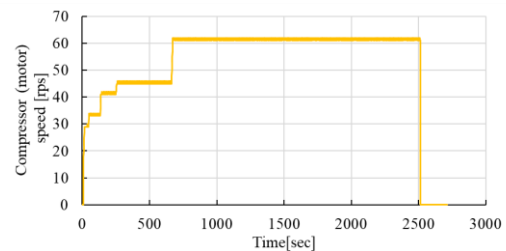


Fig. 8 Experimental result of revolutions of the compressor motor at A/C.

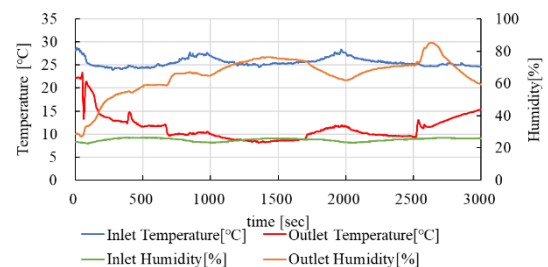


Fig. 9 Experimental data of temperature and humidity.



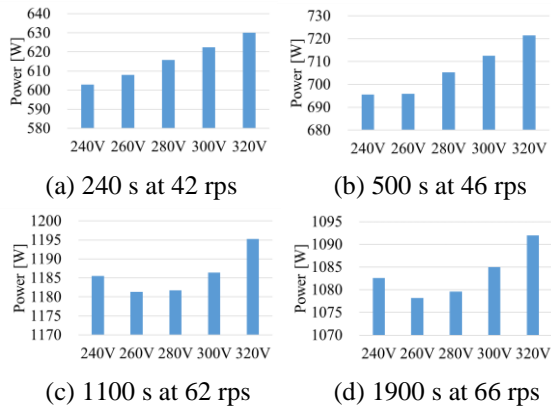


Fig.10 Input power of A/C at each voltage, when the system starts in Fig.15,16.

Figs. 8, 9 に  $V_{link}$  を変更しながら, A/C 動作を行ったときの室内機の温湿度及び圧縮機 (モータ) の回転数について示す. 環境温度は  $23^{\circ}\text{C}$  とし, その他の条件は前述の通りである. 動作後, 250 秒後には排気口の温度は  $15^{\circ}\text{C}$  以下となり, 環境による温湿度の変動はあるものの, 冷房運転が適切に行われている.

Fig. 10 に Fig. 8 および Fig. 9 に示した運転開始後の時間での  $V_{link}$  を変更した際の A/C の入力電力について示す.  $V_{link}$  を変更することでモータの導通損失とスイッチング損失を変化させることができ, 負荷条件によって最適な  $V_{link}$  の運転条件があることが考えられる.  $V_{link}^*$  は 2 秒ごとに 20V ずつ電圧を上昇させた.  $V_{link}$  は, 定常動作を行っている指令値の変更直前の 1.5 秒間の A/C への入力電力の測定データを平均化することで評価を行った.

Fig. 10(a)では, 始動後の 42 rps では, 240 V 以下に最適動作点があることがわかる. それぞれの回転数によって最適な  $V_{link}$  が異なる理由は, モータインバータのスイッチングロスが電圧によって異なり, 動作条件によってモータに流れる電流値が異なるためである. Fig. 10(b)では, 240 V と 260 V がほぼ同一の入力電力であり, 240-260 V の間に最適動作点があることが示唆される. 同様に Fig. 10(c)では, 260-280 V の間が最小入力電力となり, Fig. 10(d)では, 260 V に最適点があることが示唆された. 以上のことから  $V_{link}$  を変更することで最適点が変わり, 提案システムが A/C の高効率動作に寄与でき, A/C の効

率指標である COP の向上に直接寄与が可能であることが示された.

### 3.3 提案システムの制御性評価

Fig. 3 に示すように, 提案システムは DC リンクコンデンサを介して, 接続されている. また, Figs. 4-6 に示すようにそれぞれの変換器の制御はそれぞれの変換器の出力による外乱を受けることが想定される. 本節では, 提案システムが安定して制御が可能かどうかについて実証を行った. 本節の実験も Fig.3 に示すベンチシステムを用いて動作を行った. A/C については基本特性の評価を行うために動作をしていない. また,  $V_{link}$  は 320 V として動作の確認を行った.

Figs. 11, 12 に定常運転時の実験結果を示す. Fig. 11 は電圧波形を示している.  $V_{PV}$  は 400 V の出力設定に対して 410 V である. これは, センサのオフセットではなく, センサの誤差によるものである.  $V_{link}$  は, B-conv.によって 320 V に制御されているが, 100 Hz の振動が見える. これは, G-inv. の出力電流による影響であり,  $C_{link}$  が  $960 \mu\text{F}$  からさらに大きくすることもしく

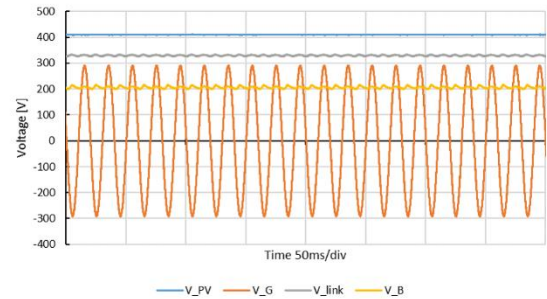


Fig. 11 Voltages of each converter in the proposed bench system shown in Fig. 3-6.

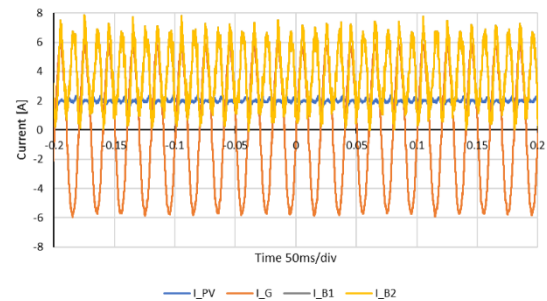


Fig. 12 Currents of each converter in the proposed bench system shown in Fig. 3-6.



Table 4 Assumed usage of hot water<sup>13)</sup>.

Days	Days in 30days	Usage
Weekday	11	470 L
	9	380 L
Weekend	3	650 L
	2	550 L
Weekend	3	380 L
in go out	2	240 L

### 3.1.2 提案システムのシミュレーション条件

Fig. 2 において,  $E_{grid}$  は系統へ流れる (逆潮流) 方向 (余剰電力出力方向) を正とする.  $E_{bat}$  および  $E_{EV}$  は充電方向を正とする. シミュレーションでは, PV は出力抑制をせず, 調整係数, 損失係数, 全天日射量, PV 容量の 4 つのパラメータの積で発電電力量  $E_{PV}$  を計算する<sup>14)</sup>.

Table 5 にシミュレーションで使用したパラメータを示す.  $E_{PV}$  の計算で使用する全天日射量はデータベース<sup>15)</sup>から調整係数は季節ごとに異なるため, Table 2 に示す. 家庭に接続される EV の接続条件は平日午後 6 時半から午前 7 時半まで, 休日は午後 6 時半から午前 10 時までと社会生活基本調査<sup>15)</sup>を基に設定した.

PV の自己消費率  $R$  は以下の式で表される.

$$R = \frac{\Sigma(E_{PV} - E_{grid}(E_{grid} > 0))}{\Sigma E_{PV}} \quad (1)$$

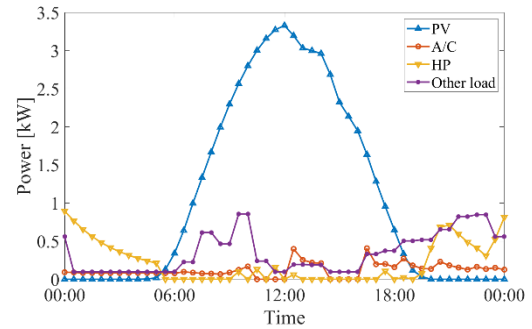
家庭における 1 日の需要電力および PV 発電

Table 5 Parameters used in simulations.

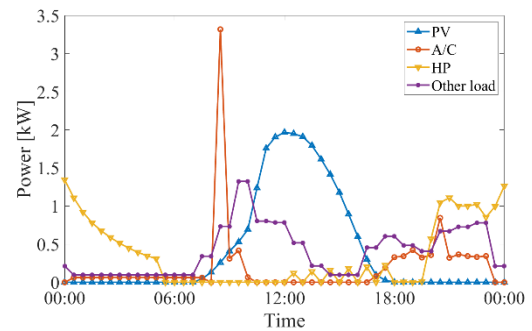
Parameter	Value
Storage battery capacity	6 kWh
EV battery capacity	40 kWh
PV capacity	4 kW
HP capacity	1.5 kW at winter
2.5 kW A/C capacity	0.456 kW
5.6 kW A/C capacity	1.485 kW
$\eta_{PC}$	0.95
$\eta_{EVC}$	0.95
$\eta_{PFC}$	0.975
Loss coefficient of PV <sup>14)</sup>	0.95

Table 2 Adjustment coefficient used in  $E_{PV}$ <sup>14)</sup>.

Month	Value	Month	Value
Jan.-Mar.	0.9	Apr.-May	0.85
Jun.-Sep.	0.80	Oct.-Nov.	0.85
Dec.	0.90		



(a) May 30<sup>th</sup>.



(b) Dec. 15<sup>th</sup>.

Fig. 14 Example waveforms of PV generated energy and demand energy.

電力を Fig. 14 に示す. Fig. 14(a)では PV の最大発電量は 3.4 kW 程度であるが, 調整係数および損失係数を考慮すると 4.2 kW 以上となり, 定格以上の発電ができています. 日中は PV 発電電力が大きい反面, 家庭の負荷が少なく, A/C, HP, およびその他の需要電力量が小さい. Fig. 14(b)では 12 月 15 日であり, 起床時の A/C の始動電力が大きいことがわかる.

その他のシミュレーション条件を以下にまとめる.

- A) 計算は 4 月 1 日 0 時 0 分から始め, 1 年間とする. 時間の粒度は 30 分である.
- B) 定置バッテリーのバッテリー残量 (SoC : State of

Charge) の初期値は半分とする。

- C) 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。
- D) 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。
- E) EV が接続されているとき、充電は EV バッテリー、放電は定置バッテリーを優先する。

EV は到着地で充放電を実施するため、家庭到着時の EV の SoC は日毎に異なる。到着地にも PV が導入されていると仮定し、SoC は PV 発電電力に相関を持つとして条件 D を設定する。

条件 E の設定理由は以下の通りである。家庭では EV の接続時間が上述のとおり、PV の発電が少ない夜間である。放電優先度は、夜間で定置バッテリーに蓄電されたエネルギーを優先的に放電し、EV バッテリーを優先的に充電することとした。つまり、定置バッテリー SoC が低い状態で翌日になる。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として有効に活用することができる。

EV および定置バッテリーの SoC が低く、電力が供給できない場合は、系統から電力を供給することでシステムは安定的に動作することが可能である。

#### 4.2 DC 接続による電力変換器損失の削減効果

本節では、家庭において冷凍空調システムの DC 接続による電力変換器ロス削減効果を示す。3.1.1 節に示したシミュレーション条件は変更せず、Fig.2 に示した提案システムと従来システムの変更のみでシステムの変更による損失の比較を行った。

Fig.2 に示すように、A/C および HP を DC 側に接続する。冷凍空調システムへの電力供給経路を考えると、DC 側および AC 側から赤色と青色に示す 2 つの経路がある。従来システムでは、PV およびバッテリーからの赤色の電力は PC および PFC を通り、A/C や HP を駆動する。系統からの青色の電力経路は PFC を通る。PV 発電電力を有効に使用したいため、赤色で示した電力供給が多いシステムにおいては、常に PC および PFC による電力ロスが生じる。一方、提案システムは赤色の経路は電力変換器がなく、青色の経路は PC を通る。つまり、冷凍空調システムの DC 接続によ

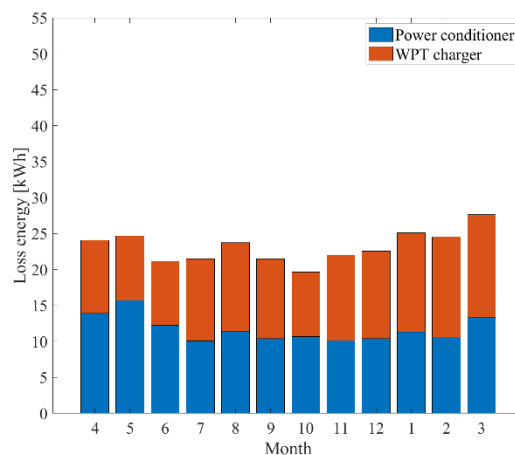


Fig. 15 Simulation result of power loss in PC and EV charger when A/C and HP are connected to DC bus.

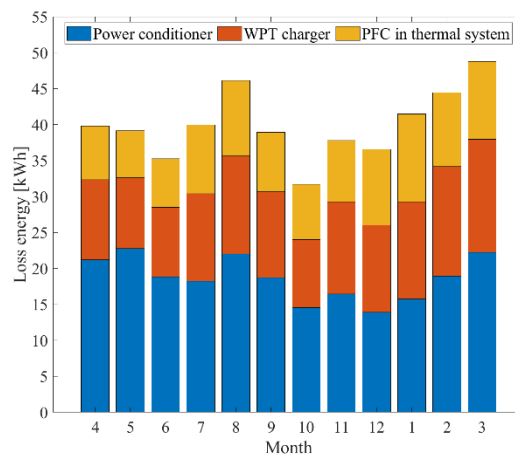


Fig. 16 Simulation result of power loss in PC, EV charger, and PFC when A/C and HP are connected to AC bus.

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 PC の電力変換ロス低減効果も見込め、系統から電力を受け取らない自立システムでは、より高効率なシステムになる。

Figs. 15,16 に冷凍空調システムの DC 接続前後における PC, EV 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示す。DC 接続により PFC の電力変換ロスをゼロにし、PC の電力変換ロスも低減した。また、冷凍空調システムの利用率も大きくなった。DC 接続前後での EV 用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、PCの電力変換ロス低減率は8月に最大48%となり、DC接続による効果大きい。特に、冷凍空調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、冷凍空調システムの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することなく、より有効に活用できることが見込める。

#### 4.3 HPの運転時間シフトによる効果

本節では、HPの運転時間シフトによるPV自己消費率改善効果に関して記述する。HPはあらかじめお湯を生成しタンクに貯めることが可能であり、これは一種のエネルギー貯蔵装置ととらえることができる。このHP運転時間をお湯の使用に影響がない範囲で開始時間を操作することによって、有効にPV発電電力を活用することを検討した。Fig. 14の1日の発電・消費電力のグラフに示すように日中の初電力が大きいため、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、日中はEVがないため、定置バッテリーのみの使用となり、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い。各家庭がPVを導入した場合は、多くの電力を系統に流さないためにPVの発電を抑制する等の対策を行うことが考えられる。

そこで、HPの運転時間に着目する。HPは電気料金が安い夜間に運転しているため、他の負

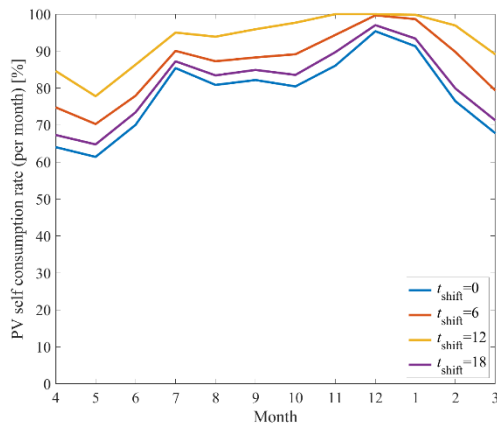


Fig. 17 PV self-consumption rate with change of HP operating shift time.

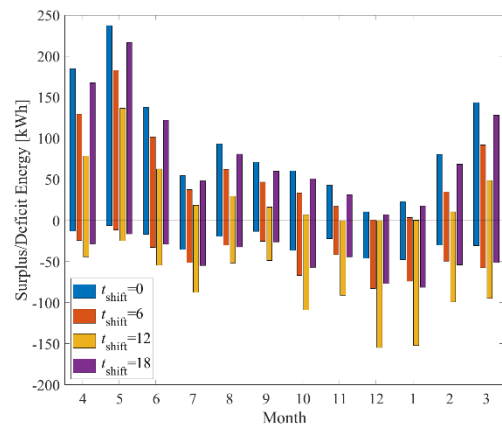


Fig. 18 Surplus(+)/deficit(-) energy with change of HP operating shift time .

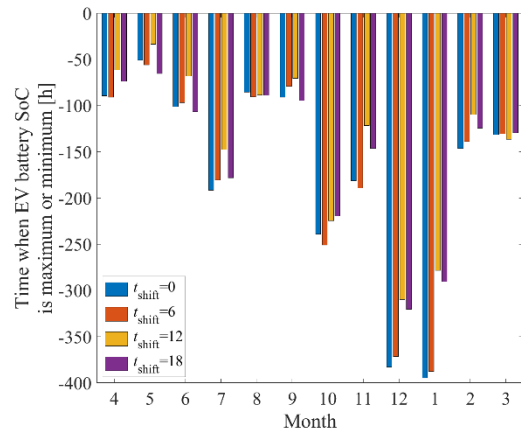


Fig. 19 Time when EV battery SoC is maximum(+) or minimum(-) with change of HP operating shift time.

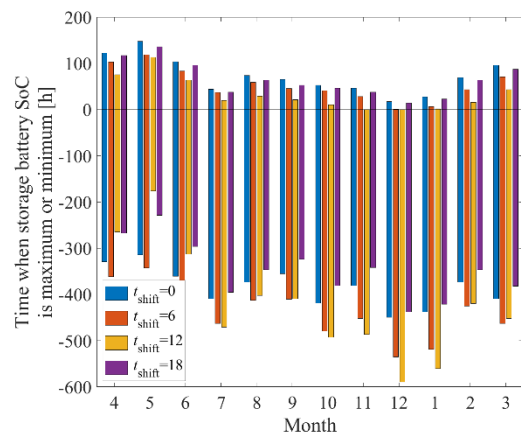


Fig. 20 Time when storage battery SoC is maximum(+) or minimum(-) with change of HP operating shift time.

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。この運転方法は夜間電力が安い 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 の運転時間をシフトさせることを検討する。

Figs. 17-19 は各月における HP の運転時間を 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それぞれ示す。Fig. 18 では余剰電力量を正、不足電力量を負として評価し、Fig. 19 では、EV バッテリーの SoC が最大の時間を正、最小の時間を負としている。Fig. 20 の定置バッテリーの SoC も同様に正負を設定した。Fig. 17 より HP の運転時間を 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。一方で、Figs. 18-20 から不足電力量が悪化し、定置バッテリーの SoC 最小時間が長くなっ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。これは、Fig. 20 の SoC 最小時間が増加していることから確認ができる。PV の容量を増加することによって秋冬間の蓄電電力の増加を行うことも可能であるが、トレードオフとして春夏間の発電時に SoC が最大値となり、系統に流出する電力が増加し、自己消費率が下がることが懸念される。改善案として、季節ごとに HP 運転時間シフト量を変化することも考えられる。

本検討では PV の自己消費率に着目して評価を行ったが、家庭の需要に対する PV の発電量の比率を示す PV の自給率や系統への負荷を示す系統への最大電力や電力量も指標とすることができる。また、PV や定置バッテリーの容量の最適な設計の問題や EV と定置バッテリーのどちらを先に充電・放電を行うかの充電戦略等の検討は多岐にわたる。先行研究として学校と家庭を接続した地域間でのエネルギーマネジメントの検討<sup>17)</sup>などがあるが、さらなる検討が必要にな

ると考えられる。

## 5. 結論

本論文では、主張点は以下の通りである。

1. A/C および HP を DC 接続した HEMS の提案
2. 古典制御による提案 HEMS の安定動作の確認
3. DC リンク電圧を変更し入力電圧を測定することで A/C の効率および COP の向上の可能性の確認
4. A/C および HP の PFC 削除による電力変換ロスを最大半分の削減
5. HP の運転時間を 12 時間シフトすることによる PV 自己消費率を最大 20%向上の確認

本提案システムは A/C や HP が DC リンク電圧に直接接続されていることから、停電時の連続運転機能や、PV 発電電力が少ない時の有効利用や発電に協調した負荷制御などが可能となる。今後は、それらの機能の実証を行い、検証を行う。さらには、A/C の高効率動作の確認を行うために AC 接続された A/C と様々な観点から比較し、高効率動作の実証を行う。さらに、充放電戦略や、家庭の設置面積やコストを含めた最適なシステム設計に関する検討を行う。

このようにシステムを通じて省エネルギーを実現し地球温暖化の防止をしつつ、社会生活の向上に貢献する研究開発を継続して行っていく。

## 記号

A/C	空調機	
DC	直流	
AC	交流	
HP	ヒートポンプ給湯器	
grid	系統	
PC	パワーコンディショナ	
bat	定置バッテリー	
EV	電気自動車	
PV	太陽電池	
PFC	力率改善整流器	
SoC	バッテリーの充電残量	%
E	電力量	kWh

$V$	電圧	V
$I$	電流	A
$C$	キャパシタンス	$\mu\text{F}$
$d$	デューティー比	-
$R$	自己消費率	-
$k$	オブザーバゲイン	-
$G$	電流ゲイン	-
$K$	電圧ゲイン	-
$f$	周波数	Hz
ギリシャ記号		
$\eta$	変換効率	%
添字		
EVC	EV 充電器	
link	DC リンク	
BL1	バッテリー側インダクタンス 1	
BL2	バッテリー側インダクタンス 2	
$x$	$x$ 軸であり系統と同相のもの	
$y$	$y$ 軸であり系統と 90deg.遅れたもの	
$c$	搬送波 (キャリア)	
P	比例ゲインを示す	
I	積分ゲインを示す	
肩付文字		
*	指令値	

## References

- 1) [https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric\\_power/ep002/results\\_archive.html](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/results_archive.html) (May, 2023).
- 2) [https://www.jema-net.or.jp/Japanese/data/jisyu/lib\\_outline.html](https://www.jema-net.or.jp/Japanese/data/jisyu/lib_outline.html) (May, 2023).
- 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." 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. Tenconi, and S. Vaschetto, "Vehicle-to-home usage scenarios for self-consumption improvement of a residential prosumer with photovoltaic roof." *IEEE Transactions on Ind. Appl.*, 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, and 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) [https://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/H30FY/000385.pdf](https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H30FY/000385.pdf) (May, 2023)
- 10) 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).
- 11) 米田 琢見, 有吉 亮, 松橋 隆治: 「電気自動車を活用したカーシェアリングシステムと充放電エネルギー管理システム的设计に関する研究」, エネルギー・資源学会論文誌, 2021, 42 巻, 4 号, p. 233-238.
- 12) M. Sato and T. Shimizu, "A novel control method on single phase grid connectable inverter with hillbert transformer." *IEEJ Trans. Ind. Appl.*, vol.121, no.10, p. 1089-1090, (2001).
- 13) Institute for Building Environment and Energy Conservation, Explanation of Energy Consumption Calculation Methods for Standards of Judgment for Residential Construction Clients. (2017).
- 14) <https://www.jpea.gr.jp/document/handout/#guide> (May, 2023)
- 15) <https://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html> (May, 2023)
- 16) <https://www.stat.go.jp/data/shakai/2021/index.html> (May, 2023)

17) 永井 栄寿, 藤田 稔之, 藤本 博志, 古井秀治 ,  
安田 善紀, 山際 昭雄 : 「太陽光発電電力量  
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」, 電気

学会 電力技術/電力系統技術/半導体電力変換  
合同研究会 , 沖縄, 2023

## **DC-Connected Home Energy Management System with Coordinated Control of Photovoltaics, Air Conditioners, Water Heaters, and Electric Vehicles**

Toshiyuki FUJITA\* Sakahisa NAGAI\* Hiroshi FUJIMOTO\* Michihiro NAKAGAWA\*\*  
Naoya YAMASHITA\*\* Shuji FURUI\*\* Yoshiki YASUDA\*\* Akio YAMAGIWA\*\*

\*Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo  
(5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8561)

\*\*Technology and Innovation Center, DAIKIN INDUSTRIES, LTD.  
(1-1, Nishi-Hitotsuya, Settsu, Osaka, 566-8585)

### **Summary**

A carbon-neutral society is working towards the realization. One of the energy-saving solution is an energy management system. This paper proposes utilizing solar power through energy-saving and energy management by connecting air conditioning and water heating systems to direct current (DC) and constructs a system which includes solar panels and batteries. We constructed an experimental bench system, confirmed its fundamental performances, and demonstrated the potential for improving the coefficient of performance (COP) through the control of DC voltage. Furthermore, simulations conducted throughout one year, we confirmed a 40% reduction of system losses by connecting DC and verified the effective utilization of generated power by operating the heat pump water heater at the daytime.

**Keywords:** Residence, Saving of energy, Air conditioning, Energy management system, Coordinated control