

太陽電池および定置バッテリーを含む家庭エネルギーシステムにおける エアコンのDC接続によるシステムの高効率化に関する基礎検討

藤田 稔之, 永井 栄寿, 藤本 博志 (東京大学)
中川 倫博, 山下 尚也, 安田 善紀, 山際 昭雄 (ダイキン工業株式会社)

Basic study on connection of air conditioners to DC bus for a high-efficiency home energy system
including solar cells and batteries

Toshiyuki Fujita, Sakahisa Nagai, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)
Michihiro Nakagawa, Naoya Yamashita, Yoshiki Yasuda, Akio Yamagiwa (DAIKIN INDUSTRIES, LTD.)

Photovoltaic generator (PV) and electric vehicles (EVs) have attracted attention as a solution for environmental problems. This paper examines the feasibility of highly efficient operation by connecting an air conditioner to DC link in a home energy system which includes a PV, storage battery, and grid-connected inverter. This paper experimentally evaluates the proposed system using a test bench. The converters are operated using a general controller. The DC link voltage was variably controlled, and the system was evaluated.

キーワード：太陽光発電, バッテリー, 系統連系, エネルギー管理, 熱システム
(Photovoltaic cell, Battery, Grid connection, 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]。特に家庭におけるエアコン等の空調に消費される電力の消費割合はおよそ35%程度であり [8]、熱エネルギーの変換の際の変換器の損失は無視できない。文献 [9] では、変換器の損失を低減するために、PVとA/Cを直流に接続した際の年間ロス低減効果について議論されている。シミュレーション上で最大48%、年間でも40%を超える変

換器損失低減効果があると報告されている。

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家庭のエネルギーシステムについて取り扱う。PVの電力を最大限利用し、空調等の変換器の損失を最小に抑えるために、それぞれの負荷を直流に接続する。本稿では、基本的な構成としてPV、定置バッテリー、A/C、系統連系の4つの変換器を直流に接続したシステムを提案する。提案システムはそれぞれのシステムが直流に接続されているため拡張することが容易であり、複数の変換器や負荷を並列に接続可能であることを特徴としている。提案システムはそれぞれの変換器を1つのコントローラで制御することを特徴としているが、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について評価する。また、独立した直流リンクに接続されていることから、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損失低減について検証を行う。さらに、直流リンク電圧が変更された後もPVの電力が一定に制御可能であることを示し、本提案システムが安定に動作可能であることを示し、有効性について確認する。

2. システム構成

Fig. 1に本稿で提案する主回路の回路図について示す。提案する本装置は最小構成と考え、発電部であるPVと、発電した電力を貯蔵するBattery、系統連携インバータ、およびA/C

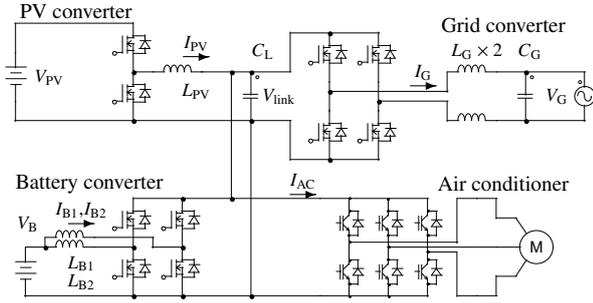


図1 提案するシステム主回路図
Fig. 1. Main circuit diagram of the proposed system.

を接続している。それぞれの変換器部の出力は DC リンクコンデンサ C_L 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 の電流制限によって、2相のインターリーブ方式とした。系統連系インバータに (G-inv.) については、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 コンバータの入力電源は、PV カーブが模擬可能な DC 電源とした。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、製品を改造し、電源入力を AC200V から DC 240 - 340 V となるように回路を変更して DC リンクコンデンサに接続した。

Fig. 2 に提案するシステムにおけるそれぞれの変換器の制御ブロック図について示す。本報告においては、各コンバータの制御はそれぞれのコンバータの FB 制御を行っており、フィードフォワード (FF) 制御の実装は行っていない。Fig. 2(a) には、PV-con. の制御について示しており、一般的な PI 電流制御を示している。明示的に示してはいないが、それぞれの変換器の Duty の制御指令値 d には、 $0 \leq d \leq 1$ のリミッタを実装している。PI ゲインについては、重根極配置を行っている。Fig. 2(b) は、B-con. による DC リンク電圧の制御について示しており、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. 2(a) 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、本報告においては、40 A とした。

Fig. 2(c) は、G-inv. による系統電流の制御を表している。本報告においては、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 として力率 1 制御を本報告では行った。位相については、系統電圧を Phase Locked Loop (PLL) 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

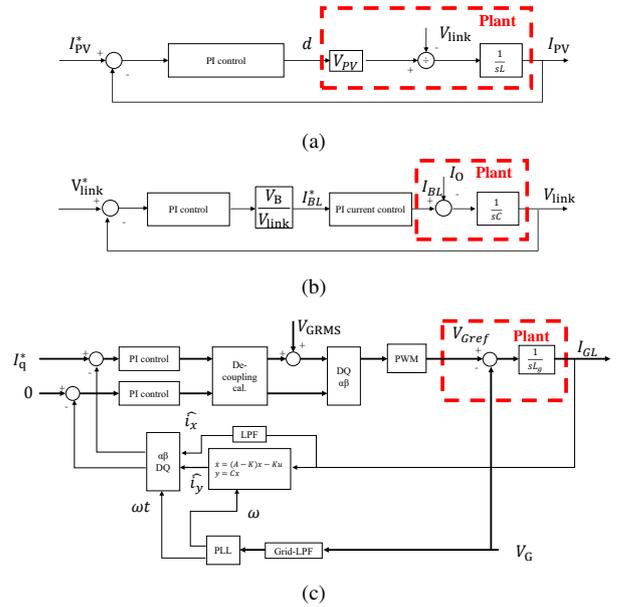


図2 それぞれの変換器の制御ブロック図 (a) PV-con. の電流制御ブロック図 (b) B-con. の電圧制御ブロック図 (c) G-inv. の電流制御ブロック図

Fig. 2. Block diagrams of each converters. (a) Current control diagram of PV-con. (b) Voltage control of B-con. (c) Current control of G-inv.

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 (LPF) を V_G 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 [10]。本報告においては、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。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_x \\ i_y \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} i_x \\ i_y \end{pmatrix} - \mathbf{K} i_{GL}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_x \\ i_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1 & -\omega \\ \omega + k_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_x \\ i_y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix} i_{GL} \quad (1)$$

k_1, k_2 はそれぞれオブザーバゲインである。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波数による離散化を行い、PE-Expert4 の PEV ボードに実装し提案する実験機の評価を行った。A/C の改造については電源入力を AC 電圧から DC 電圧に変更したのみであり、A/C の圧縮機モータの制御については変更を行っていない。

3. 実験結果

Fig. 3 に本報告における実験機について示す。A/C については、環境温度を含めた温湿度を測定を行っている。吸気口および排気口は、室内機の温度を示している。また、Table 1 に本実験における回路素子および、制御パラメータについて示す。制御器については、PE-Expert4 を用いて構成した。

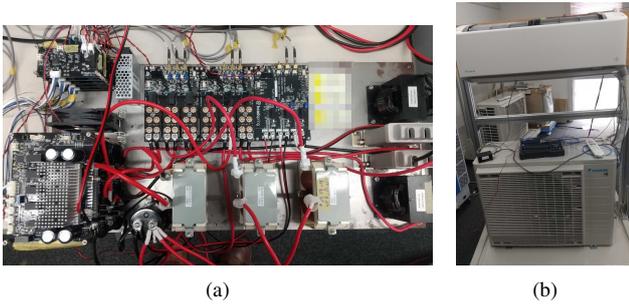


図3 実験機外観写真 (a)PV-con., B-con, G-inv. の試作実験機
(b) A/C の試験ベンチ
Fig.3. Photo of the proposed systems. (a) Test bench system of PV-con., B-con., and G-inv. (b) Bench system of A/C.

表1 実験パラメータ
Table 1. Experimental parameter

carrier frequency	20 kHz	C_G	20 μ F
P gain of PV-conv.	4.8	L_{PV}	1.2 mH
I gain of PV-conv.	1 kHz	r_{PV}	164 m Ω
P gain of B-conv.	3.5	L_{B1}, L_{B2}	448, 450 μ H
I gain of B-conv.	857 Hz	r_{B1}, r_{B2}	5.2, 6.5 m Ω
P current gain of B-conv.	3.5	L_G	440 μ H
I current gain of B-conv.	2 kHz	C_G	20 μ F
P gain of G-conv.	2.0	V_{PV}	max. 400 V
I gain of G-conv.	500 Hz	V_B	200 V
LPF of V_G	8 kHz	V_G	200 V _{rms}
LPF of I_{GL}	4 kHz	V_{link}^*	240-320 V
Current observer gain	4 kHz	I_{PV}^*	1.2, 2 A
Designed dead time	500 ns	I_p^*	4 Arms

これらの条件を用いて変更をすることによって以下の節に示す本提案システムの実証を行った。

〈3・1〉 提案システムの制御性評価 Fig. 1 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、Fig. 2 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。本節の実験では A/C の動作は行わず、Fig. 3(a) に示す試作実験機のみ動作を行った。また、本節での実験は V_{link}^* は 320 V として動作の確認を行った。

Fig. 4 に実験結果について示す。Fig. 4(a) に電圧依存性について示している。 V_{PV} は 400 V の出力設定に対して 410 V となっている。これは、オフセットではなく、センサゲインの誤差によるものと推定している。 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_L が 960 μ F からさらに大きくすることもしくは、制御ゲインを大きくすることによって変動が小さくなることが考えられる。 V_B も V_{link} と同様に 100 Hz の変動が見られているが、これは、実

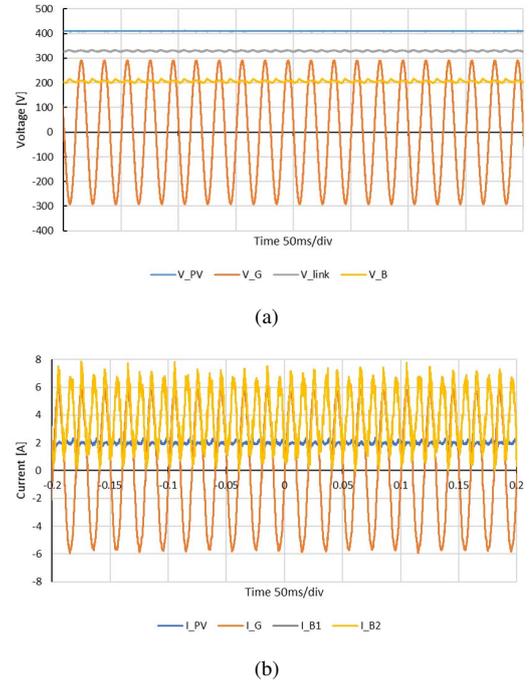
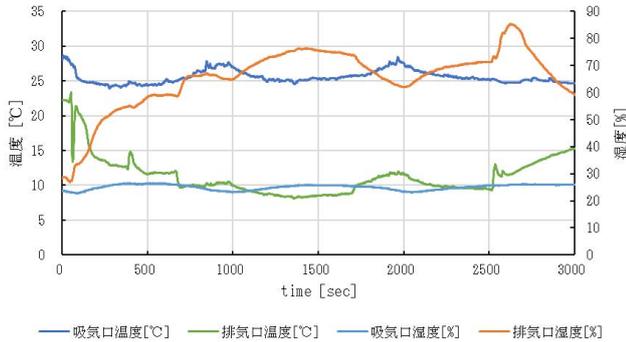


図4 提案システムの電流電圧特性
Fig.4. Voltages and currents of each converters in the proposed system.

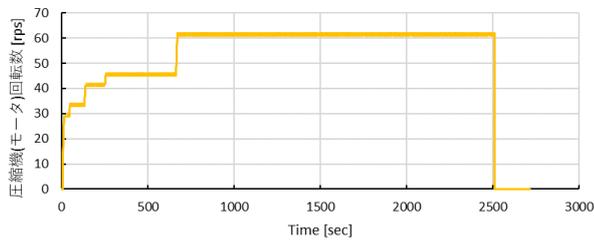
験機からバッテリー模擬負荷までの配線および、内部コンデンサ容量によるものと考えられる。

Fig. 4(b) は電流依存性について示している。 I_{PV} は 2 A に制御されているが、 V_{link} の変動と同様に、100 Hz の振動が確認できる。 I_G は系統に出力される電流を表しており、Fig. 1 に示すように、電流の極性について注意すると系統に力率 1 で系統連系動作をしていることが確認できる。 I_{B1} および I_{B2} については、 V_{link} を一定に保ち I_G の正弦波に伴う脈動を抑制するために電流が振動している。以上のことから、一般的な制御を実装することによって、DC リンク電圧の制御が可能であることが示された。

〈3・2〉 V_{link} 電圧変更による A/C の高効率運転の可能性次に、A/C が高効率動作が可能かについて検証した。A/C の動作中は温度および湿度さらに、A/C 内の圧縮機（モータ）の回転数について計測を行った。温度および湿度は K 熱電対および、HIOKI 製 Z2000 を使用して 1 s 間隔で測定を行った。 V_{link} 電圧は 240 V に制御されており、適切なタイミングで DC リンク電圧指令値を変更し、各電流電圧特性について測定した。また、DC リンク電圧の有効利用範囲を拡大するために、Grid 電圧は 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 $^{\circ}$ C とした。実験機は、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に、リモコ



(a)



(b)

図5 A/Cの室内機の温湿度および、圧縮機（モータ）回転数の実測データ

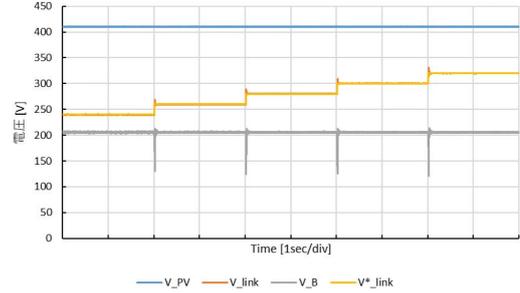
Fig. 5. Experimental data of temperature and humidity and revolutions of the compressor motor at A/C.

ンから停止指令を出し、エアコンの動作を停止した。実験機については、A/C停止後、600秒後に運転を停止した。

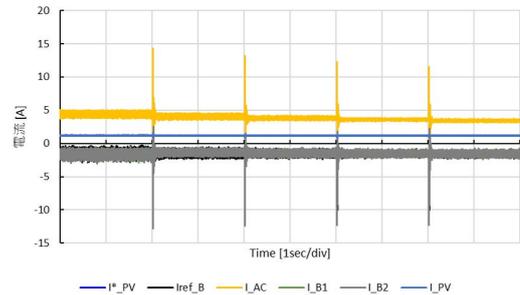
Fig. 5にDCリンク電圧を変更しながら、A/C動作を行ったときの室内機の温湿度及び圧縮機（モータ）の回転数について示す。環境温度は23℃として、その他の条件は測定値に示す通りである。動作後、250秒後には排気口の温度は15℃以下となり、環境による温度や湿度の変動はあるものの、冷房運転が適切に行われている。

Fig. 6に約1100秒時にDCリンク電圧指令値を変更したときの実測波形について示す。指令値は2秒ごとに20Vずつ電圧を上昇させた。指令値を変更した直後にDCリンク電圧のオーバーシュートがみられる。また、同時に各電流にリンギングがみられる。A/C入力電流は V_{link} の変更に伴って、段階的に減少していることがわかる。指令値の変更時にオーバーシュートが見られるが、その他については、良好な動作を確認している。

Fig. 7に各時刻における各DCリンク電圧におけるA/Cの入力電力について示す。DCリンク電圧は、Fig. 6と同様に指令値を変更し、安定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した。Fig. 7(a)では、始動後の42rpsでは、240V以下に最適動作点があることがわかる。(b)では、46rpsでは、240Vと260Vがほぼ同一の入力電力であるため、240-260Vの間に最適



(a)



(b)

図6 始動後、約1100s後のA/C運転時のシステムの電流電圧特性

Fig. 6. characteristics of voltages and currents at A/C running after around 1100 s.

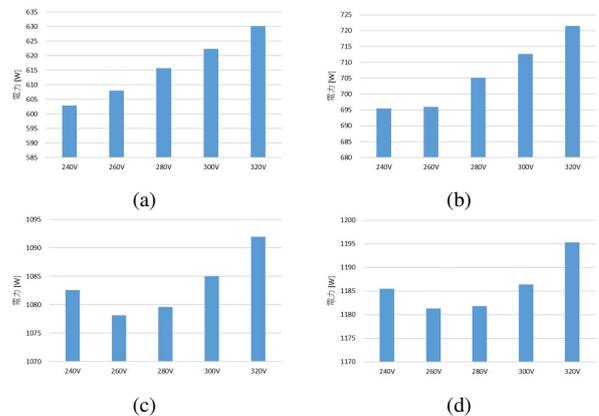


図7 各測定点におけるA/Cへの入力電力 (a)240秒後回転数42 rps (b) 500秒後46 rps (c) 1100秒後62 rps (d)1900秒後62 rps

Fig. 7. Input power of A/C. (a) about 240 s at 42 rps. (b) 500 s at 46 rps. (c) 1100 s at 62 rps. (d) 1900 s at 62 rps.

動作点があることが示唆される。同様に (c) では、260Vが最小入力電力となり、(d) では、260-280Vの間に最適点があることが示唆された。以上のことからDCリンク電圧を変更することで最適点が変わることがわかり、提案システムがA/Cの高效率動作に寄与できることが示され、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

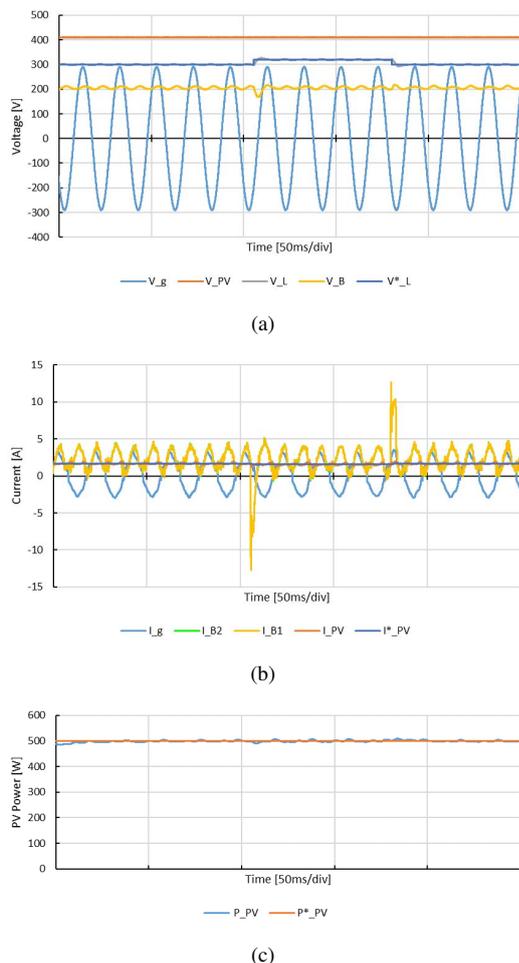


図8 V_{link} 電圧変更時における各電流電圧特性
Fig. 8. Characteristics of currents and voltages at V_{link} change.

が示された。

〈3・3〉 V_{link} 電圧変更による PV 制御評価 提案するシステムは DC リンク電圧を可変とすることを特徴としている。そのため、PV は最大電力制御 (MPPT 制御) を行い、電力を最大化することが重要である。本システムにおいては最大化した電力が V_{link} を変更した後も良好に追従することの確認を行った。Fig. 2(a) に示す電流制御の外ルーブに電力指令値 P^*_{pv} を設け、 V_{link} と割り算を行うことで I^*_{pv} の指令値の生成を行っている。本報告においては P^*_{pv} を 500 W として実験を行った。

Fig. 8 に本検討における検討結果について示す。Fig. 8(a) は電圧の特性を示しており、 V_{link} 電圧指令値を変更後も良好に追従している様子が見取れる。電圧の変更に伴って V_b が変動しているが、Fig. 4 と同様に、バッテリー模擬負荷である AC/DC コンバータの内部コンデンサ容量および、配線によるものと考えられる。Fig. 8(b) は試験機の各電流の特性を示しており、電圧指令値の変更によりサージが I_b に見られているがそれ以外については良好な動作を確認してい

る。Fig. 8(c) には PV の発電電力について示しており、 P_{pv} は V_{link} と I_{pv} の乗算によって計算を行っている。また測定値については、10 Hz の LPF を実装している。 P_{pv} も良好に制御されており、 V_{link} の変更を行っても良好に制御されていることが確認できる。

4. 結論

本稿では、DC リンクに PV、定置バッテリー、A/C、系統連系の 4 つの変換器を接続したシステムについて提案した。提案システムはそれぞれの変換器を 1 つのコントローラで制御することを特徴としているが、基本特性の確認を行うために一般的な FB 制御を実装した際のシステムの安定性の評価を行った。系統連系インバータを動作させることによって、DC リンク電圧およびその他システムが系統周波数の 2 倍の変動を持つことが確認されているが、安定的に動作していることを確認できた。また、DC リンク電圧を変更し、A/C の入力電力の変動を確認したところ、A/C の各動作点において最適点が異なっていることが確認され、今後の検証を行うことによってさらなる効率および、COP の向上が期待できることが示された。さらに、直流リンク電圧が変更された後も PV の電力が一定に制御され、本提案システムが安定に動作可能であることが示された。

本システムは停電時に A/C が連続運転が可能となる機能や、系統連系インバータを用いないことから、PV の電力を最大限得られる機能などを有すると考えられる。今後は、それらの機能の実証を行い、さらなる機能の確認について検証を行っていく。さらには、A/C の高効率動作の確認として、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。

文 献

- (1) Agency for Natural Resources and Energy, Statistics of Electric Power (2021), 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/electricpower/ep002/resultsarchive.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/liboutline.html> (閲覧 2022/12/14)
- (3) V. Gevorgian, P. Koralewicz, S. Shah, E. Mendiola, R. Wallen, H. V. Pico, "Photovoltaic plant and battery energy storagesystem integration at NREL's Flatirons campus." National Renewable Energy Laboratory, Technical report, NREL/TP-5D00-81104, (2022)
- (4) P. Chayarun, K. Kawabe, 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." *IEEE Trans. Elec. Electron. Eng.*, vol. 16, pp. 226-237, (2021)

- (5) F. Giordano, A. Ciocia, P. D. Leo, A. Mazza, F. Spertino, A. Tenconi, S. Vaschetto, "Vehicle-to-home usage scenarios for self-consumption improvement of a residential prosumer with photovoltaic roof," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 56, no. 3, pp. 2945-2956 (2020).
- (6) R. Fachrizal, 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) 一般財団法人日本エネルギー経済研究所, 「平成 30 年度電力需給対策広報調査事業報告書」, 経済産業省, https://www.meti.go.jp/eti_lib/report/H30FY/000385.pdf (閲覧 2022/12/14)
- (9) 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」, 電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会, SPC-23-064, (2023).
- (10) 齋藤 真, 清水 敏久, 「ヒルベルト変換を用いた単相系統連系インバータの制御法-単相電流の d-q 座標での制御-」, 電学論D, 121 巻, 10 号, p. 1089-1090, (2001).