

コンシューマ・デバイス論文

太陽光発電自立動作時における 最大発電可能電力の予測手法

小坂 忠義^{1,a)} 渡辺 雅浩² 松田 勝弘³ 浅利 真宏⁴ 勝木 伸夜⁵

受付日 2012年9月14日, 採録日 2013年1月17日

概要: 大震災などにより電力供給が途絶えた場合にも, 家庭での生活維持に必要な電力を太陽光発電用 PCS の自立運転で賄うための HEMS 制御技術を検討した. 日射量の変化などによって PCS 出力が低下する場合には, 優先順位の低い機器の負荷を減らして, PCS の過負荷状態を回避する. 本システムを実現するため, 市販されている数種類の PCS について, 日射量や負荷が変動した場合の自立運転時の直流電圧, 直流電流, コンデンサ電圧などの挙動を調査した. その結果より, 日射量計を用いずに PCS の動作状態から最大発電可能電力を予測する手法を新たに提案する.

キーワード: HEMS, PCS, 自立運転, 太陽光発電, 蓄電池

Maximum Power Prediction Method for Isolated Operation of Solar Generation Systems

TADAYOSHI KOSAKA^{1,a)} MASAHIRO WATANABE²
KATSUHIRO MATSUDA³ MASAHIRO ASARI⁴ SHINYA KATSUKI⁵

Received: September 14, 2012, Accepted: January 17, 2013

Abstract: We studied a HEMS control technology to maintain daily life in house, even when the power black-out occurs by a disaster like a heavy earthquake. Our target system can reduce the power of the lower priority appliances when a power supply from a solar power generator reduced by a natural solar radiation decrease. The priorities of the appliances should be set preliminarily. In order to develop this system, we researched the DC-voltage, the DC-current, and the capacitor voltage of the several commercially available PCSs, when the solar radiation changed in the self-operating mode. Finally, we propose the maximum power prediction method for isolated operation of solar generation systems without pyranometer.

Keywords: HEMS, PCS, self-operating, solar power generation, battery

¹ 株式会社日立製作所横浜研究所
Yokohama Research Laboratory, Hitachi Ltd., Yokohama,
Kanagawa 224-0817, Japan

² 株式会社日立製作所日立研究所
Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd., Hitachi, Ibaraki
319-1292, Japan

³ 東北電力株式会社研究開発センター
Research & Development Center, Tohoku Electric Power
Co., Inc., Sendai, Miyagi 981-0952, Japan

⁴ 一般財団法人電力中央研究所システム技術研究所
System Engineering Research Laboratory, Central Research
Institute of Electric Power Industry, Komae, Tokyo 201-
8511, Japan

⁵ 日立コンシューマエレクトロニクス株式会社 EMS ソリューション部
EMS Business Department, Hitachi Consumer Electronics
Co., Ltd., Yokohama, Kanagawa 224-0817, Japan

a) tadayoshi.kosaka.vf@hitachi.com

1. はじめに

東日本大震災により, 電気・ガス・水道などのライフラインが長期間途絶え, 多くの家庭で生活維持が困難になった. 震災後の在宅被災者の状況と対応行動を調査した研究 [1] によれば, 電力の途絶率が震災直後は約 75%であり, 10%を切るまでに 7 日間を要した.

現在市販されている住宅向け太陽光発電用 PCS (Power Conditioning System) のほとんどは, 系統電力の停電時に自立運転に切り替えて運転できる機能がある. その多くは, 本体に設置された非常用コンセントから電力を供給する. しかし, 1,500 W という上限電力が設定されているため, 利用できる機器に制限がある. また, 雲の動きなどの

自然変動によって電力供給が上下するため、安定して利用することができない。

一方で、家電機器を制御して節電を行ったり、電力使用量を計測して表示したりする HEMS (Home Energy Management System) が各社より提案されている [2], [3]。

当研究では、平常時には電力使用量の確認や節電を行い、停電時には太陽光発電装置の発電変動に合わせて家電機器の需要調整を行う HEMS 制御技術を検討した。本稿では、特に HEMS 制御のトリガとなる太陽光発電 PCS の最大発電可能電力の予測手法を中心に述べる。

2. 先行研究

停電時に分散電源と蓄電池を有効利用するため、選択負荷遮断機能を持った需給管理システムがシミュレータ上で検討されている [4]。複数の負荷にあらかじめ優先順位を定め、電力供給不足の場合には優先順位の低い負荷から電力を遮断するシステムである。太陽光発電の最大発電可能電力は日射量計を用いて算出する。

また、発電用の太陽電池とは別にモニタ用太陽電池を用いて最大発電可能電力を求めるシステムが提案されている [5]。モニタ用太陽電池の解放電圧から最大発電可能電力を求め、供給不足の際には消費電力の大きい負荷から順にブレーカを遮断する。

しかしながら、日射量計やモニタ用太陽電池によって最大発電可能電力を予測するこれらの手法は、敷設工数による高コスト化の問題と、実際の太陽光発電パネルとの位置のずれや特性の違いによる測定誤差の問題が予測される。

3. 電力自立システムの制御方法の検討

3.1 基本構成

本稿で検討する電力自立システムは、停電時に太陽光発電や蓄電池あるいは EV (Electric Vehicle = 電気自動車) から家庭内に給電するシステムである。全体構成を図 1 に示す。平常時、PV (Photo Voltaic = 太陽電池) からの直流出力は PCS で交流に変換され、分電盤で宅内の電力線に接続される。PCS から停電時の電力を供給する非常コンセントは自立切換え器に接続されている。自立切換え器は非常コンセントからの出力と電力系統からの出力を切り換える装置である。自立切換え器内には変圧器が設けられており、非常コンセントの 100 V を 200 V に電圧変換する。自立切換え器から分電盤に入った電力は、100 V もしくは 200 V の家電に接続される。分電盤には電力を測定する機能と、HEMS コントローラからの制御信号によって個別ブレーカの開閉を制御する機能がある。各家電は HEMS コントローラから制御可能であり、必要に応じて動作モードを変更することで消費電力を調整できる。蓄電池は HEMS コントローラに蓄電残量の情報を送り、制御信号に応じて蓄電・放電・停止の状態を切り換える。蓄電池の市販価格

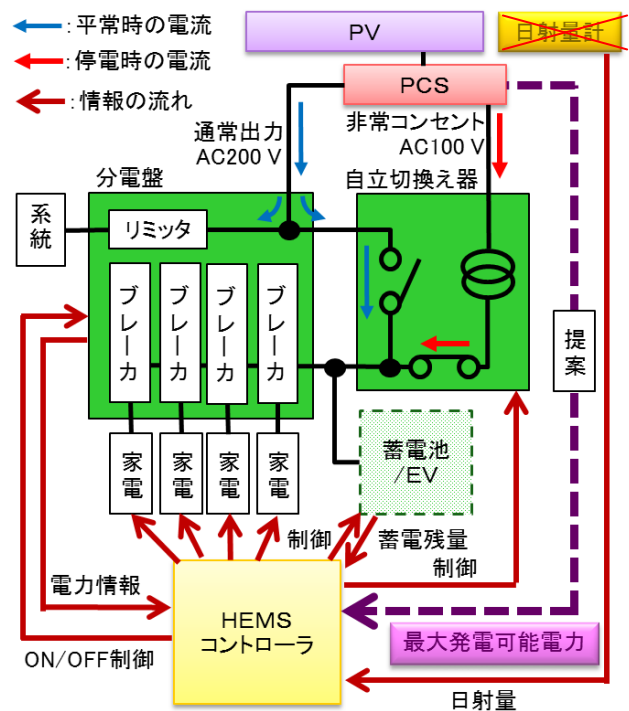


図 1 電力自立システムの構成

Fig. 1 Schematic diagram of isolated operation system.

は高いので、蓄電池のある場合とない場合の両方を想定する。

自立運転中の制御トリガとなる最大発電可能電力の予測には、日射量計は用いず、PCS から直接情報を得る方法を提案する。発電中の PV の動作特性から最大発電可能電力を予測することで、日射量計の敷設工数削減による低コスト化と、測定精度の向上を図る。

当システムを用いることで、日射量変化があった場合にも、宅内機器を停止させることなく長時間にわたって電力を利用することができる。

3.2 蓄電池の有無に応じた家電制御手法

(1) 蓄電池がある場合の充放電制御

充電と放電を瞬時に切り換えられ、充電電力と放電電力を自由に調整する機能を有する蓄電池がある場合、PV はつねに最大電力で発電し、過不足を蓄電池の充放電で賄う。図 2 に宅内の発電電力と電力需要の時間変化に応じた連続的な蓄電池の充電・放電制御方法の例を示す。

深夜から朝にかけては蓄電池からの放電で電力需要を満たす。その後太陽が昇り、太陽電池による電力供給量が電力需要を上回ったら蓄電池への充電に切り換える。天候の変化により日射量が低下し、再び供給が需要を下回れば、蓄電池からの放電に切り換える。放電電力、充電電力は需給ギャップに応じて蓄電池が連続的に変化させる。この制御方法を用いる場合の HEMS コントローラの役割は、蓄電残量を管理して、残量がなくならないように需要を計画的に制御することである。

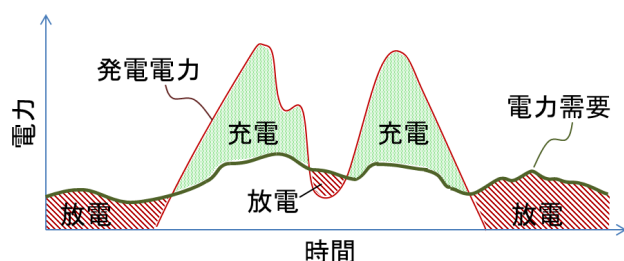


図 2 宅内の発電電力と電力需要の時間変化に応じた連続的な蓄電池の充電・放電制御方法

Fig. 2 Continuous control method of charging and discharging battery depending on power supply and demand in house.

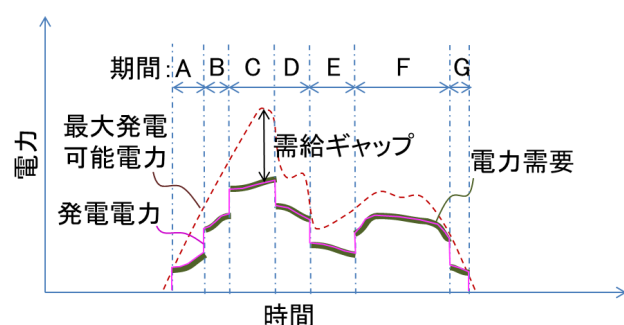


図 3 宅内需給ギャップに応じた断続的な家電の制御方法

Fig. 3 Periodic control method of home appliances depending on supply-demand gap in house.

表 1 家電機器の期間帯別の動作状態

Table 1 States of home appliances in each period.

優先 順位	機器	期間帯別の動作状態						
		A	B	C	D	E	F	G
1	家電 A	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
2	家電 B	OFF	ON	ON	ON	OFF	ON	OFF
3	家電 C	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF

(2) 蓄電池がない場合の家電制御

蓄電池がない場合には、PV は電力需要に応じて発電し、宅内の電力需要が最大発電可能電力を超えそうな場合に宅内の各家電機器の消費電力を調整する方法が考えられる。消費電力の調整には、家電機器の動作モードを変更したり、ブレーカの ON/OFF を制御したりする方法を用いる。図 3 に宅内需給ギャップに応じた家電の制御方法を示し、表 1 に図中の A-G の期間における家電機器の動作状態を示す。ここでは簡易的に家電が 3 種類で、動作状態も ON/OFF しかない場合を例に説明する。

HEMS コントローラの記憶装置には、あらかじめ各家電機器の優先順位が設定されている。太陽が昇り始めの期間 A では、HEMS コントローラは太陽光発電装置の最大発電可能電力を基に優先順位の最も高い家電 A を動作させる

のに十分な電力供給がある場合に動作信号を出す。このとき、時間とともに最大発電可能電力は上昇するが、PCS は電力需要に応じて発電を行う。期間 B では、最大発電可能電力と電力需要の差分である需給ギャップが十分大きいと判断して家電 B を動作させる。期間 C においては、同様に判定後家電 C を動作させる。期間 D では気象の変動により最大発電可能電力が減少したことを検知して家電 C を停止させる。期間 E では、さらに最大発電可能電力が減少するので、家電 B を停止させる。期間 F で気象条件が改善されると、家電 B を動作させるのに十分な電力供給があると判断して家電 B を再度動作させる。期間 G では太陽が傾き再び日射量が減少するため、家電 B を停止させ、さらに日射量が減少した場合には家電 A も停止させる。

制御判定に用いる宅内電力需要は使用電力を測定することで簡単に得られるが、最大発電可能電力は予測が困難である。前章で述べたとおり、日射量計やモニタ用太陽光パネルを用いる必要があり、コストや精度の課題がある。次章以降では、日射量計を用いなくて最大発電可能電力を正確に測定する手法について検討した結果を示す。

4. 最大発電可能電力の予測手法に関する予備実験

4.1 負荷変動による過負荷出力停止時の動作解析

これまでの検討で、宅内システムを長期間にわたって自立動作させるためには、太陽光発電用 PCS の最大発電可能電力の把握が必要であることが分かった。しかし、市販されている太陽光発電用 PCS には最大発電可能電力を測定したり、通知したりする機能がない。ここでは、自立運転時に負荷を変動させた場合の太陽光発電用 PCS の動作解析を行い、過負荷による出力停止を事前に予測することができないか調査した。

太陽光発電用 PCS (機種 A) の非常用自立運転コンセントに負荷を接続した場合の直流電圧-直流電流の時間変動を図 4 に示す。各データは 20 ms ごとに計測した。

当初 550 W の負荷を接続し、10 秒後に負荷を追加して 650 W としたところ、実験開始から 29 秒で過負荷となり、出力が停止した。横軸直流電圧、縦軸直流電力のグラフ上の動作点の推移を図 5 に示す。インバータ回路の損失があるので、直流電力は負荷 550 W の場合は約 600 W、負荷 650 W の場合は 700 W の電力で動作していた。出力停止する直前、太陽光発電 PCS は最適動作点を探索するため、動作電圧を約 20 V まで低下させてから 220 V まで上昇させるという動作を行った。このとき得られた曲線は太陽光パネルの動作特性そのものを表すと考えられ、異なる PCS でも同じ日射量どうしの比較ではほぼ同じ軌跡を描いた。

出力停止の瞬間の直流電圧、内部コンデンサ電圧、交流出力電圧の時間推移を図 6 に示す。直流電圧、コンデンサ電圧がほぼ同じタイミングで電圧低下した後、交流出力電

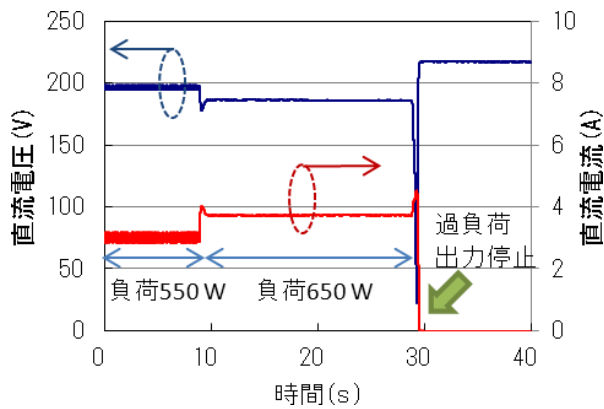


図 4 自立運転中の直流電圧と直流電流の時間変動

Fig. 4 DC-voltage and DC-current of PV at isolated operation.

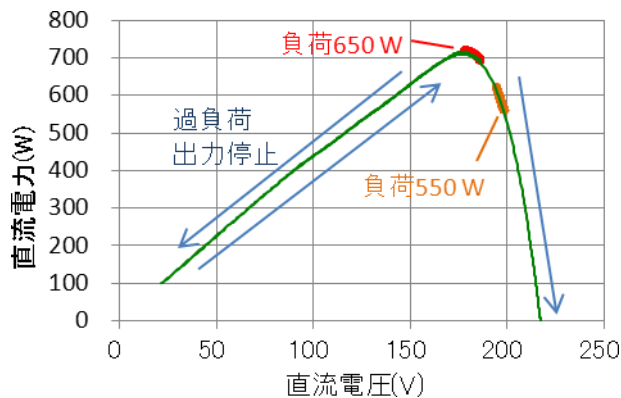


図 5 自立運転中の動作点の移動

Fig. 5 Moving of isolated operating point of PV.

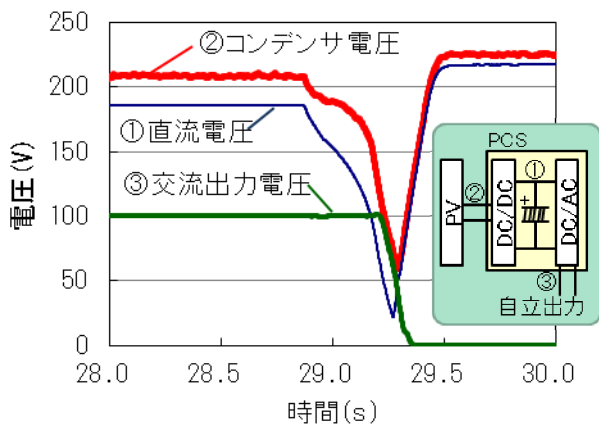


図 6 出力停止の瞬間の各電圧の時間変動

Fig. 6 Various voltage change at the time of power down.

圧が低下することが分かる。

直流電圧、コンデンサ電圧の変化をトリガとして需要負荷を制御しようとした場合に利用できる時間的な余裕を検討した。それぞれの閾値を、コンデンサ電圧が10%低下する時間、あるいは直流電圧がピーク電力位置に相当する170Vまで低下する時間と想定した。図6から、交流出力電圧が電気事業法で定められた家庭用電源の下限電圧である95Vを下回るまでの時間差はそれぞれ0.3秒、0.2秒であることが分かった。直流電圧、コンデンサ電圧の変化を

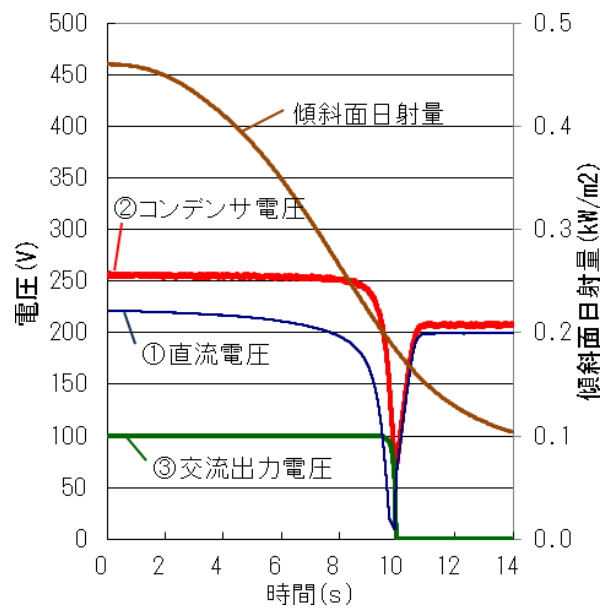


図 7 日射量変動時における各電圧の時間変動

Fig. 7 Various voltage change at rapid sun-light down.

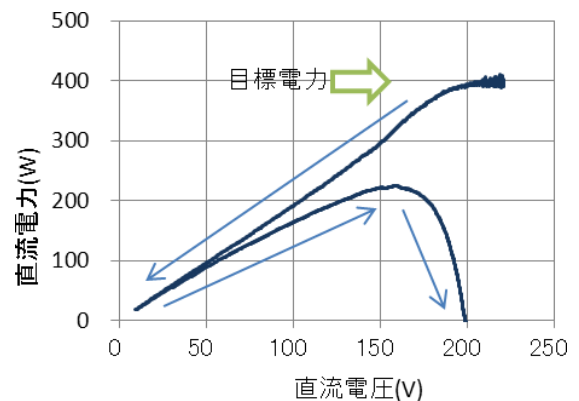


図 8 日射量変動時における動作点の動き

Fig. 8 Moving of isolated operating point of PV at rapid sun-light down.

トリガとして需要負荷を制御しようとした場合には0.3-0.2秒以内に負荷を制御する必要があり、実現困難であることが分かった。

4.2 日射量低減による過負荷出力停止時の動作解析

次に、雲の移動により、日射量が急激に低下した際の自立運転PCS（機種B）の動作を検証した。直流電圧、コンデンサ電圧、交流電圧の変化を図7に示し、動作点の動きを図8に示す。日射量計は太陽光パネルと平行に設置する傾斜面日射量計を用いた。

図7から、日射量が14秒間に70%以上低下したことが分かる。この間、PCSは電力負荷に応じた発電量を保つため、動作点を電圧の低い方向に移動させた。その後、最大発電可能電力が目標電力を下回ったため、太陽光発電PCSは最適動作点を探索するため、動作電圧を約10Vまで低下させてから200Vまで上昇させるという動作を行った。

表 2 直流電圧およびコンデンサ電圧の低下と交流出力低下の時間差
Table 2 Time intervals between DC-voltage or charged voltage down and AC-voltage down.

機種	変動要因	直流電圧低下(閾値 170 V)と交流出力低下(閾値 95 V)の時間差 (s)	コンデンサ電圧低下(閾値 10%)と交流出力低下(閾値 95 V)の時間差 (s)
A	負荷	0.3	0.2
A	日射	0.3	0.2
B	日射	1.0	0.7
C	日射	0.6	変動なし
D	日射	0.4	変動なし
E	日射	0.5	0 (ほぼ同時)

コンデンサ電圧が 10%低下する時間、および直流電圧がピーク電力位置に相当する 170 V まで低下する時間を閾値として想定した。コンデンサ電圧、直流電圧が閾値に達してから交流出力電圧が 95 V を下回るまでの時間差はそれぞれ 1.0 秒、0.7 秒であった。

同様に 5 機種分の時間差を測定した結果を表 2 にまとめた。機種 A は負荷変動による動作と日射量の変動による動作がほぼ同じであった。機種 C、機種 D ではコンデンサ電圧の変化がある場合とない場合が観測された。機種 E はコンデンサ電圧の低下が観測されたが、交流出力の低下とはほぼ同時だった。

以上より、直流電圧の変化をトリガとして需要負荷を制御しようとした場合には 0.3 秒以内に負荷を制御する必要がある、実現困難であることが分かった。また、コンデンサ電圧は、PCS 停止直前に電圧変動が見られないケースがあるため、負荷制御のトリガには利用できないことが分かった。

5. 提案手法

5.1 自立運転時の動作点における電力と最大発電可能電力の相関性

様々な日射量における太陽光パネルの動作曲線を図 9 に示す。日射量に応じて直流電力が大きくなる方向へ曲線が変化する。最大発電可能電力は日射量と相関性が高く、日射量が大きいほど最大発電可能電力も大きい。傾斜面日射量と最大発電可能電力の関係を示した図 10 から、両者が略比例関係にあることが分かる。近似直線から計算される最大発電可能電力と実測値との誤差は図示した 7 点で最大 4.0%であった。

ここで、図 9 において、最大発電可能電力を示す直流電圧より低い電圧範囲の動作曲線に着目すると、この電圧範囲の電力も日射量と相関性が高いことが分かる。そこで、低い電圧範囲の動作点における直流電力から最大発電可能電力を予測する手法を検証した。低い電圧範囲の代表とし

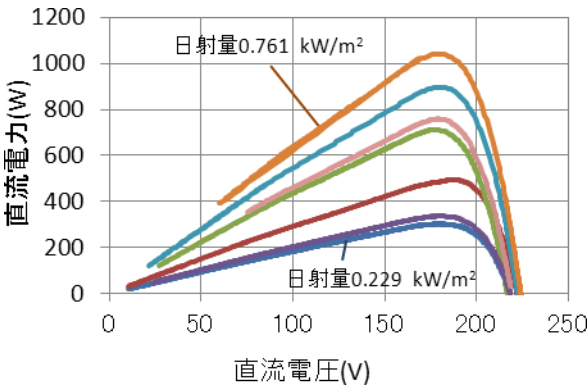


図 9 様々な日射量における太陽光パネルの動作曲線
Fig. 9 PV operating curve at various sun-light.

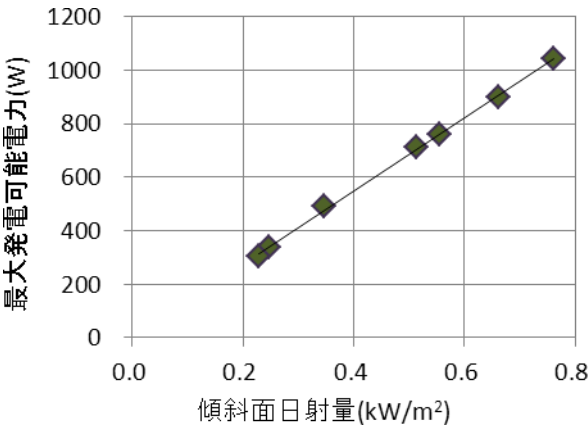


図 10 最大発電可能電力の傾斜面日射量依存性
Fig. 10 Maximum output power depending on sun-light.

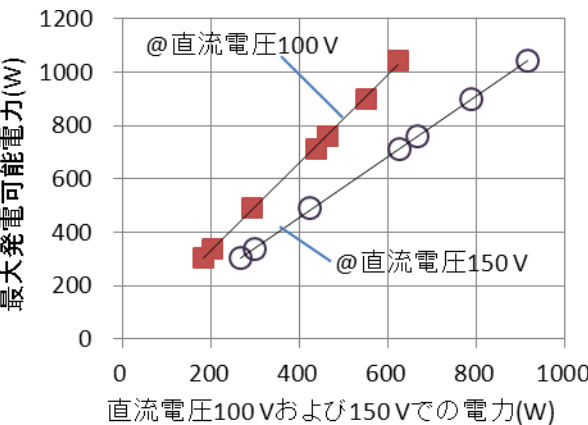


図 11 直流電圧 100 V および 150 V における直流電力と最大発電可能電力の関係
Fig. 11 Maximum output power depending on powers at 100 V and 150 V.

て、直流電圧 100 V および 150 V における直流電力と最大発電可能電力の関係を図 11 に示す。両者ともに最大発電可能電力と略比例関係にあることが分かる。近似直線から計算される最大発電可能電力と実測値との誤差は、直流電圧 100 V の場合は最大 2.2%、150 V の場合は最大 2.1%であった。なお、日射量計を用いる方法より精度が高くなっ

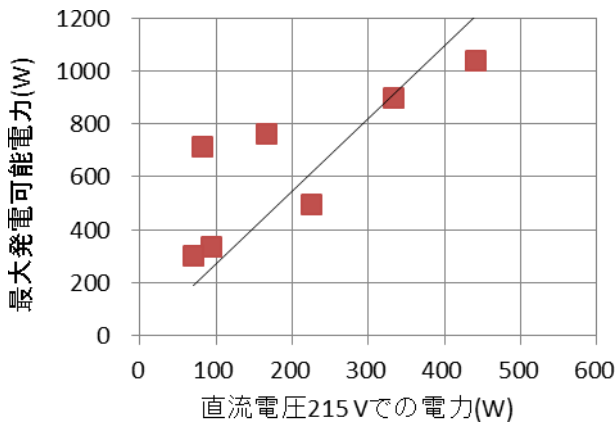


図 12 直流電圧 215 V における直流電力と最大発電可能電力の関係

Fig. 12 Maximum output power depending on powers at 215 V.

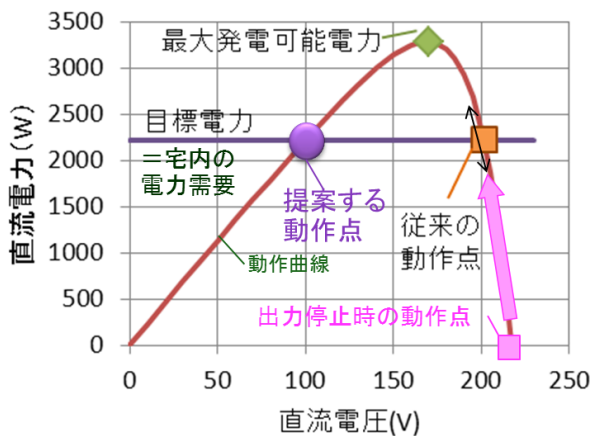


図 13 自立運転 PCS における新たな動作点の提案

Fig. 13 Proposal of new isolated operating point.

た理由については、日射量計と太陽光パネルとの位置の違いにより、たとえば雲の通過による日射変動のタイミングに差異が生じた可能性が考えられる。また、用いた日射量計の応答時間が長い（18 秒）、日射量が大きく変化した場合に誤差が生じる可能性も考えられる。

比較のため、最大発電可能電力を示す直流電圧より高い電圧範囲の電力についても同様の検証を行った。高い電圧範囲の代表例として、動作電圧 215 V の直流電力と最大発電可能電力との関係を図 12 に示す。図から、動作電圧 215 V における直流電力と最大発電可能電力との相関性が低いことが分かる。この電圧範囲は太陽光パネルの特性上、パネル温度の影響で誤差が大きくなるものと考えられる。近似直線から計算される最大発電可能電力と実測値との誤差は最大 68.6%であった。

5.2 自立運転時の動作点から最大発電可能電力を予測する手法の提案

図 13 に直流電圧-直流電力平面上の太陽光発電パネルの動作曲線と、従来の自立運転時の動作点を示す。宅内の電力需要に応じた目標電力を得るためには、動作点が 2 つ

考えられるが、今回調査した 5 機種の PCS はすべて最大発電可能電力を示す電圧よりも高い電圧範囲で動作点を定めていた。

そこで、動作点を最大発電可能電力を示す電圧よりも低い電圧範囲で設定し、動作点の直流電圧と直流電力から最大発電可能電力を予測する手法を新たに提案する。動作中の測定値から、図 11 のグラフを参照することで、日射量計を用いることなく最大発電可能電力を求めることができる。

本手法によれば、日射量計の敷設工数削減による低コスト化が可能となる。また、日射量計と太陽光パネルの位置の違いや、日射量計の応答速度に起因する測定誤差を改善し、高い測定精度を得られる。

本手法のデメリットは、2 つ考えられる。1 つは最大発電可能電力よりも約 10% 程度電流が大きくなることである。これにより筐体内の発熱が課題となる可能性がある。ただし、PCS は直流制御を行う機能ブロックと交流に変換するインバータの機能ブロックから構成されているので、ただちに発熱が 10% 増加するわけではない。今後は、直流制御ブロックの発熱が全体の発熱に与える影響を検証する必要がある。

本手法の 2 つ目のデメリットは、制御手法が従来より複雑な点である。従来の動作点における制御手法を、図 13 を用いて説明する。出力停止時の動作点は最も電圧の高い解放電圧の位置にある。ここを出発点とし、目標電力に到達するまで電圧を下げ、到達後は目標電力に合うように電圧を調整するという手順で制御ができる。解放電圧から本稿提案の動作点に移動させるためには、最大発電可能電力の前後で動作が異なるので、制御手法が複雑化する。本手法を取り入れることで、PCS に通信機能を持たせる必要がある点も合わせて、制御系のコストアップ要因を検証する必要がある。

6. おわりに

本研究では、太陽光発電装置の自立動作によって生活維持に必要な電力を長時間確保する HEMS 制御技術を検討した。

制御手法は、蓄電池のある場合とない場合について考察した。蓄電池のない場合においては、あらかじめ HEMS コントローラに設定した優先順位に基づいて機器の電力負荷を制御する手法を検討した。その結果、制御のトリガに用いる最大発電可能電力を低コストで正確に予測する手法が重要であるという結論に達した。

従来の研究では、最大発電可能電力は日射量計やモニター用太陽光パネルを用いて算出していたが、敷設コストの増加、位置の違いや応答速度に起因する誤差が課題であった。そこで本研究では、太陽光発電 PCS の自立動作の解析を行い、発電用太陽光パネルの特性から最大発電可能電力を

算出する方法を考案した。

当研究で提案するシステムを用いることで、日射量変化があった場合にも、宅内機器を停止させることなく長時間にわたって電力を利用することができる。

今後は、より多くの太陽光パネルの特性を用いて当研究による最大発電可能電力の算出方法の精度を検証し、さらなる改善を検討する。また、自立運転時に HEMS コントローラによって家電や蓄電池を制御する試作システムを作成し、長時間自立運転を続けるための新たな課題の抽出を行う。

参考文献

- [1] 朝野賢司, 齋藤 晋, 杉山大志: 東日本大震災・被災地におけるエネルギー利用実態調査, 電力中央研究所報告 Y11027 (Mar. 2012).
- [2] 日立コンシューマエレクトロニクス株式会社ニュースリリース「HEMS を活用した生活支援サービス事業に参入」(Mar. 2012), 入手先 (<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2012/03/0323.html>).
- [3] 九代紀之, 伊藤善朗: 大船スマートハウスの概要と構成技術, 三菱電機技報, Vol.86, No.2, pp.24-27 (2012).
- [4] 浅利真宏: 低圧系統需給インターフェースの開発, 電力中央研究所報告 R05029 (Dec. 2006).
- [5] 安部裕司, 田中邦穂, 前川正弘: 太陽光発電装置, 公開特許公報, 特開平 9-149554 (1997 年 6 月公開).



小坂 忠義

1967 年生。1993 年名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年富士通研究所入社。2007 年株式会社日立製作所入社。需要家向け EMS (Energy Management System) に関連する研究に従事。電気学会会員。



渡辺 雅浩 (正会員)

1966 年生。1991 年 3 月広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年株式会社日立製作所日立研究所入社。電力系統の解析および制御の研究に従事。電気学会, IEEE 各会員。



松田 勝弘

1986 年 3 月山形大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月東北電力株式会社入社。現在, 同社研究開発センター電力流通グループ勤務。主に分散形電源の系統連系, 電力品質管理に関する研究に従事。博士 (工学)。



浅利 真宏

1966 年生。1988 年 3 月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。1990 年 3 月同大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月 (財) 電力中央研究所入所。現在, 同研究所主任研究員。主として分散形電源の系統連系影響評価および需給インタフェースの研究開発に従事。1997 年 7 月~1998 年 8 月米国テキサス大学アーリントン校 (UTA) 客員研究員。IEEE 会員。



勝木 伸夜

1970 年生。1989 年株式会社日立製作所入社。需要家向け EMS (Energy Management System) に関連する販売・企画業務に従事。