

再生可能エネルギー地産地消型エネルギーマネジメントシステム

Energy Management System for Local Consumption for Local Product Control

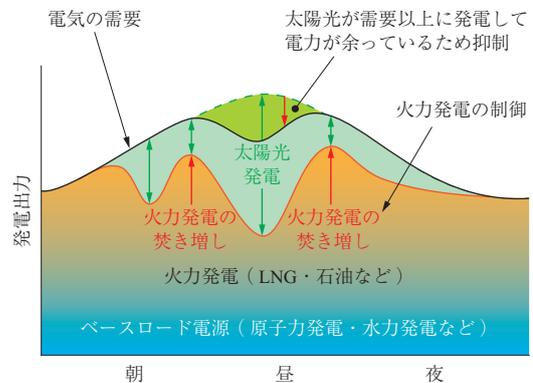
稲村 彰 信 技術開発本部プロジェクトセンター CO2フリープロジェクトグループ 主査
高井 紀 浩 ソリューション・新事業統括本部ソリューションエンジニアリング部 主査 技術士（機械部門）
矢野 美沙子 技術開発本部プロジェクトセンター CO2フリープロジェクトグループ
濱口 謙 一 技術開発本部プロジェクトセンター CO2フリープロジェクトグループ
高見 彰 資源・エネルギー・環境事業領域事業開発部

温室効果ガスの排出量削減のために、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーが急速に導入されている。しかし、天候や時間による変動が大きい再生可能エネルギーの大量導入は、既存の電力システムシステムに悪影響を及ぼす可能性がある。2018年4月に開所した、そうま IHI グリーンエネルギーセンターでは、地産地消型のエネルギーマネジメントシステム（地産地消型 EMS）によって、既存の送配電システムに逆潮流できない制約条件のもとで、太陽光発電電力を最大限有効活用している。本稿は地産地消型 EMS の概要およびその制御の特長について記載する。

There has been a rapid deployment of renewable energy systems such as photovoltaic generation systems and wind farms in order to reduce greenhouse gas emissions. However there is a high risk that many deployments of renewable energy systems may have a negative impact on the existing commercial power grid system due to large fluctuations caused by weather and time of day. The Soma IHI Green Energy Center (SIGC), launched on 2018 April, is equipped with the Energy Management System for Local Consumption for Local Product Control, in which the power generated by photovoltaic generation systems are consumed as far as possible in the center due to restrictions that prohibit back feeding to the commercial grid. This paper outlines and describes the features of the control implemented by the Energy Management System for Local Consumption for Local Product Control.

1. 緒 言

地球温暖化の原因と考えられている CO₂ などの温室効果ガスの排出量削減のために、太陽光発電（PV：Photovoltaics）や風力発電などの再生可能エネルギー（以下、再エネ）が国内外で急速に導入されている。しかし、PV や風力発電は変動性再生可能エネルギーとも呼ばれ、天候や時間による変動が大きいという弱点を抱えている。これら変動性再生可能エネルギーの大量導入は、既存の電力システムシステムにおいて電圧や周波数といった電力の品質に悪影響を及ぼすことが懸念されている⁽¹⁾。国内で導入されている再エネの 40%程度⁽²⁾は変動性再生可能エネルギーが占め、そのほとんどが PV である。PV の日中の変動分は、出力調整が可能な火力発電などで電力の需給バランスを調整しているが、調整能力を超える PV 余剰電力が生じた場合には、最終的に PV を抑制することになる。第 1 図⁽¹⁾に電力需給のイメージを示す。再エネ拡大のためには、この行き場のない余剰電力の取扱いが課題であり、既存の電力システムシステムに支障をきたすことな



第 1 図 電力需給のイメージ
Fig. 1 Graph of demand and supply of electricity

く、かつ再エネの余剰電力を最大限に有効活用できることが望ましい。

株式会社 IHI はこのような課題に対する解決策の一つとして、地域で作った再エネ電力を地域内で完全に活用する、地産地消型エネルギーマネジメントシステム（EMS：Energy Management System, 以下、地産地消型 EMS）を開発した。現在、地産地消型 EMS は、福島県相馬市に開設した、そうま IHI グリーンエネルギーセンター⁽³⁾（SIGC）

Soma IHI Green Energy Center) で運用している。SIGC の周辺地域では既設の高圧配電系統の空き容量がゼロのため、センター内で発電した PV 電力を既設系統に逆潮流できないという制約がある。この厳しい制約のもと、地産地消型 EMS は、PV 余剰電力を蓄電池や水素、蒸気などの別のエネルギー媒体へ転換・貯蔵することで再エネの地産地消を実現している。

本稿では SIGC の取組み、地産地消型 EMS の概念および機能、制御システムを説明し、実運用の成果を述べる。

2. SIGC の取組み

2.1 SIGC のコンセプト⁽⁴⁾

SIGC は、福島県相馬市と共同で相馬市の中核工業団地の一角に、2018 年 4 月に開所したスマートコミュニティ関連事業および実証の推進拠点である。第 2 図に SIGC の概要を示す。

SIGC の基本コンセプトは、再エネ導入による地域での温暖化ガス削減と街の防災機能の強化や地域活性化を目指した、「水素を活用した CO₂ フリーの循環型社会の構築」⁽⁵⁾ である。また、相馬市復興計画と連携した新しい

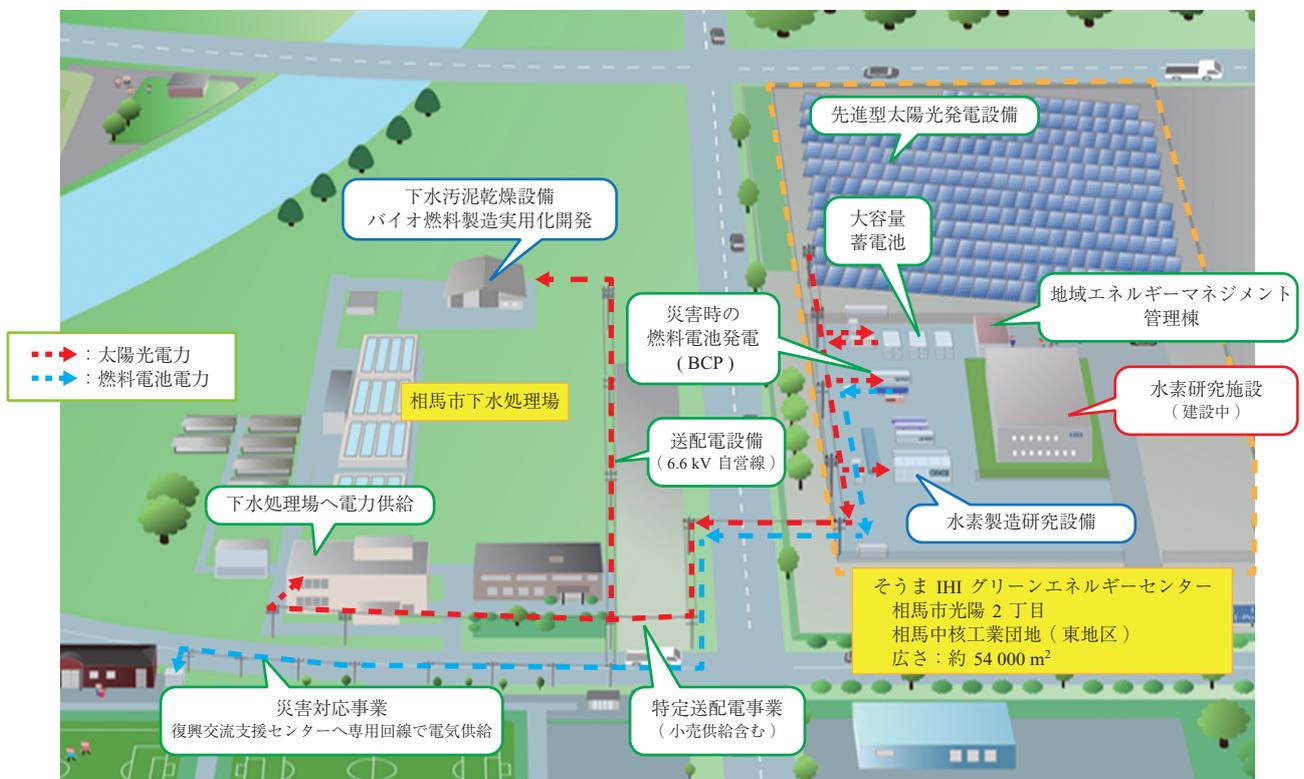
街づくりの一助となるべく、将来の水素社会を見据えつつ、エネルギーの脱炭素化を狙ったものである。この基本コンセプトに基づき、地域でつくった再エネ電力を地域内で完全消費する「再エネの地産地消」を実現するために、変動する再エネに応じて余剰電力を蓄電池や別のエネルギー媒体へ転換・貯蔵し有効利用することを目指した。第 3 図にスマートコミュニティのコンセプトを示す。

次に設備やシステムの構築条件を示す。

- (1) 相馬市の立地・気象条件から再エネには PV を採用する。
- (2) PV 電力は既設系統に逆潮流が認められないため、専用の自営線で下水処理場や SIGC 内設備に供給する。
- (3) PV 余剰電力は蓄電池に充電し、夕方や夜間に放電することによってピークシフト対応する。
- (4) 余剰電力の一部は電気ボイラで蒸気に転換した後、水電解装置で水素に転換し有効利用する。
- (5) 発電および余剰電力の蓄電池充放電や蒸気・水素への転換を統括制御する。

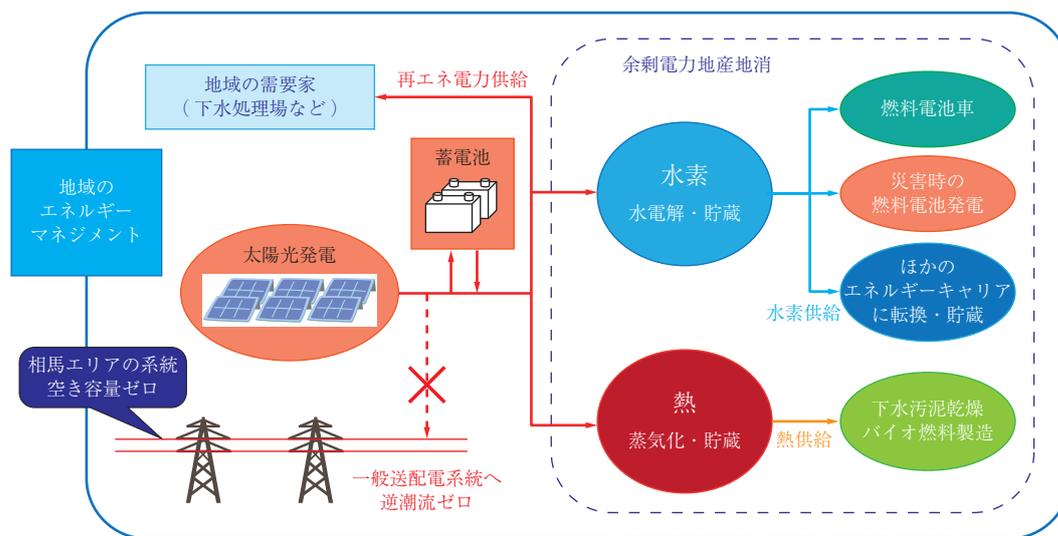
2.2 設備概要

SIGC の設備概要を第 1 表に示す。PV はパワーコン



(注) BCP: Business Continuity Plan, 事業継続計画

第 2 図 そうま IHI グリーンエネルギーセンター
Fig. 2 Soma IHI Green Energy Center (SIGC)



第3図 スマートコミュニティのコンセプト
Fig. 3 Concept of SIGC Smart Community

第1表 主要設備一覧
Table 1 Specification of major facilities in SIGC

設備区分	設備・機器名称	仕様	
発電設備	太陽光発電 (PV)	発電出力 1 600 kW, PCS*1 群 (計 38 台) 出力 1 250 kW	
蓄電設備	リチウムイオン二次電池	容量 2 500 kW・h, PCS*1 500 kW	
熱転換設備	電気ボイラ	最大出力 400 kW	
水素転換設備	災害対応設備	PEM*2 型水電解装置	水素製造能力 15 Nm ³ /h
		水素貯蔵タンク	水素貯蔵容積 150 Nm ³ (0.85 MPa)
	水素製造研究設備	PEFC*3 型燃料電池	最大出力 25 kW
		PEM*2 型水電解装置	水素製造能力 30 Nm ³ /h
配電設備	高圧配電設備 (自営線), 系統連系受電設備	6.6 kV こう長約 1 200 m 既設系統連系点にて逆潮流防止機能付	
	非常用低圧配電設備	200 V/400 V こう長約 600 m	
制御監視設備 (地産地消型 EMS)	CEMS (地域エネルギーマネジメントシステム)	見える化, 発電および需要予測, 状態監視, 計画	
	LLC (地産地消制御システム)	逆潮流防止制御, 発電監視, 充放電監視, 余剰電力配分制御, 既設系統からの購入電力監視	

(注) *1: Power Conditioning System
*2: Polymer Electrolyte Membrane, 固体高分子膜
*3: Polymer Electrolyte Fuel Cell, 固体高分子形燃料電池

ディショナー (PCS: Power Conditioning System) の出力で 1 250 kW, 標準的な世帯の約 500 世帯分を発電できる。PCS には, 小出力タイプを複数台組み合わせ合わせた分散型を採用し, 発電状況や需要側の変動に合わせて PV 出力を制御できる。

PV 電力は, 既設系統とは独立した専用の 6.6 kV 自営線 (こう長約 1 200 m) を介して, 下水処理場や SIGC 内の各設備に供給している。なお, PV や蓄電池の電力が不足する場合は, 既設系統から電力を供給できるようになっている。

PV 余剰電力は蓄電池または蒸気, 水素に転換され蓄えられる。蓄電設備はリチウムイオン二次電池 (容量

2 500 kW・h, PCS 出力 500 kW) を採用し, 日中は余剰電力を充電シタ方から夜間の需要に対し放電する運用を行うほか, PV 電力の急激な変動にも追従して充放電を行い, 供給電力の安定化を図っている。蒸気は, 電気ボイラで電気から転換され, 下水処理場で発生する汚泥の乾燥に利用し, 下水汚泥の減容化やその処理費用の削減に貢献している。また, 水素は複数の水電解装置によって転換・貯蔵され, 停電などの非常時には燃料電池発電設備と専用配電線によって非常用電源を供給できるようになっており, 地域の防災機能の強化に貢献している。貯蔵水素は, そのほか, 来る水素社会に向けた水素関連の研究に利用している。

これらの発電、蓄電、需要設備は、地産地消型 EMS によって統括監視・制御され、安定した PV 電力の供給および既設系統への逆潮流防止のためのさまざまな制御が行われている。

3. 地産地消型 EMS の概要

SIGC および周辺地域は、既設系統の空き容量がゼロで、新規の再エネ電力は発電しても既設系統には供給（逆潮流）できない。そこで SIGC では、地産地消型 EMS の構築にあたり、PV の発電量および需要の予測・監視・計画を行う地域エネルギーマネジメントシステム（CEMS：Community Energy Management System）に加え、PV 余剰電力の既設系統への逆潮流防止と自営線内で蓄電および蒸気・水素に転換し、再エネを最大活用するための各設備・装置を統括制御する地産地消制御システム（LLC：Local consumption for Local product Control）を構築した。すなわち、地産地消型 EMS は、CEMS と LLC の二つによって構成される。以下、地産地消型 EMS の中核となる LLC の制御内容について解説する。

4. LLC の制御

LLC は下水処理場などで消費しきれない PV 余剰電力が生じた場合や自営線内需要が低負荷時において、次の機能を担っている。

- (1) 蓄電池充放電監視および時間帯別制御による余剰電力タイムシフトと変動平滑化
- (2) 自営線系統内の低負荷時における PV-PCS 運転台数制御
- (3) 既設系統からの購入電力上下限の逸脱防止制御
- (4) PV 余剰電力の蒸気・水素への変換量制御

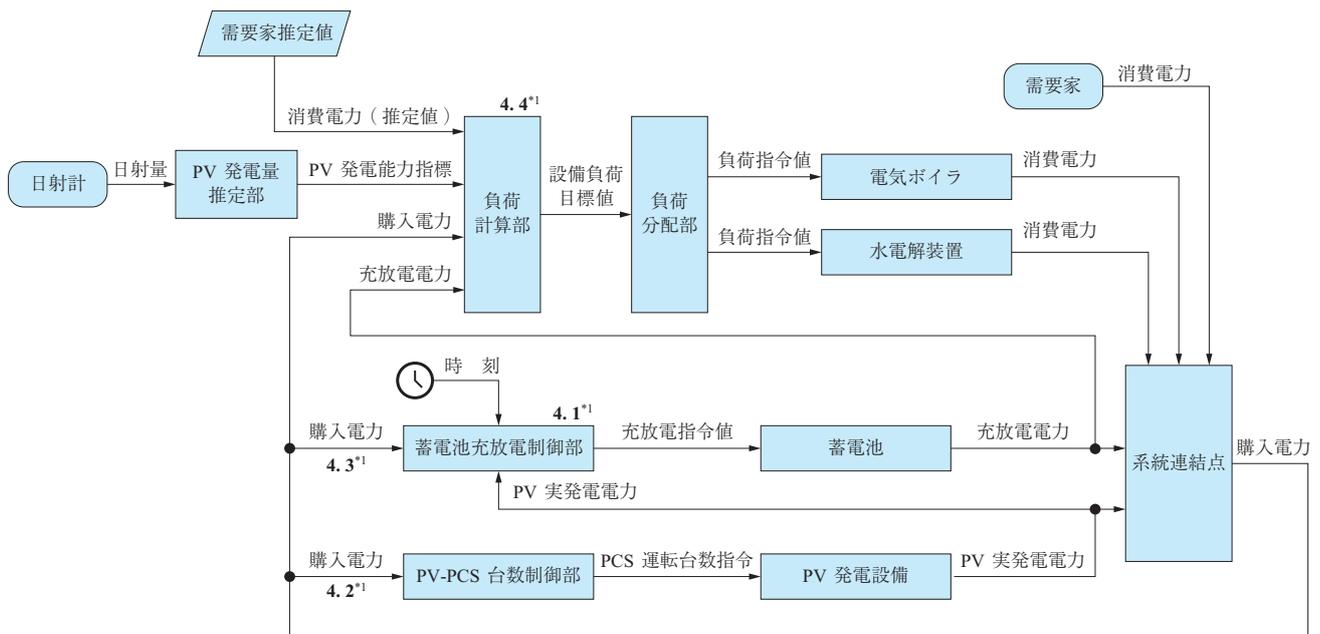
冒頭で述べたように、変動性再生可能エネルギーである PV は、時間帯や天候などの周囲環境によって発電電力が増減する。LLC は、上記四つの制御によって、コミュニティ内での需給状況を統括して制御することで、既設系統に逆潮流することなく、発電電力と負荷電力とのバランスを維持している。

LLC のフィードバック・ループの模式図を第 4 図に示す。以下、第 4 図を参考にしながら、これらの機能について説明する。

4.1 蓄電池充放電監視および時間帯別制御による余剰電力タイムシフトと変動平滑化

LLC は、PV 余剰電力の一部を昼間に蓄電し、夜間に使用するタイムシフトを行う。この余剰電力の活用は、あらかじめ設定された蓄電池の充放電タイムスケジュールに従って時間帯別に制御されており、充電された余剰電力は主に下水処理場の夜間負荷に使用され、夜間購入電力の削減に寄与している。

また PV の発電量は雲の陰りによる影響で、1 秒間で定



(注) *1: 本文内のそれぞれの節を参照。

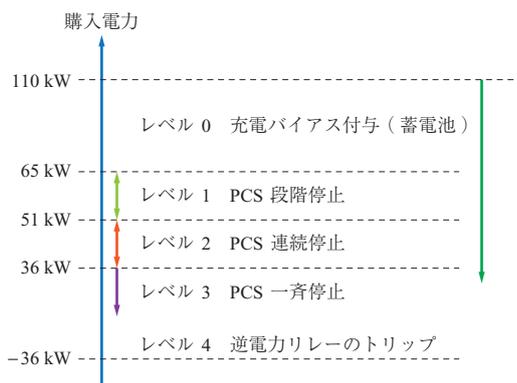
第 4 図 地産地消制御システム (LLC) のブロック線図

Fig. 4 Block diagram of Energy Management System for Local Consumption for Local Product Control

格の 50%以上変動し得る。LLC はこの変動量を蓄電池による充放電電力で PV 実発電電力を平滑化し、PV 出力変動を緩和して、自営線系統内の電力需給バランスの安定性を高めている。具体的には、PV 実発電電力値と移動平均値から求めた値の差分を充放電指令値とし、PV 実発電電力の変動を平滑化している。

4.2 自営線系統内の低負荷時における PV-PCS 運転台数制御

逆潮流防止のためには、常に 0 kW 以上の購入電力が自営線系統内に流れている状態を維持しなければならない。そのため LLC では、逆潮流防止制御も行っている。第 5 図に逆潮流防止制御のレベル設定を示す。購入電力の低下（自営線系統内負荷に比べて PV 実発電電力が大きいとき）に応じて五つの動作モードを備えている。レベル 0 は購入電力が 110 kW を下回った場合の蓄電池による充電バイアス制御であり、詳細は 4.3 節で述べる。レベル 1 は、購入電力が 65 kW を下回ったときのモードであり、このレベルでは購入電力が設定されたしきい値を



第 5 図 逆潮流防止制御 レベル設定
Fig. 5 Settings to prevent back feeding

低下するごとに、1 台の PCS を停止させる。レベル 2 ではさらに購入電力が 51 kW を下回った場合であり、このレベルの状態が続く限り、ある演算周期ごとに 4 台ずつ PCS を連続停止させる。レベル 3 は PCS 一斉停止、レベル 4 は逆電力リレーのトリップで逆潮流を防止するが、これらは基本的に異常時の対応で、通常運転ではレベル 0 からレベル 2 による制御で逆潮流を防止する。

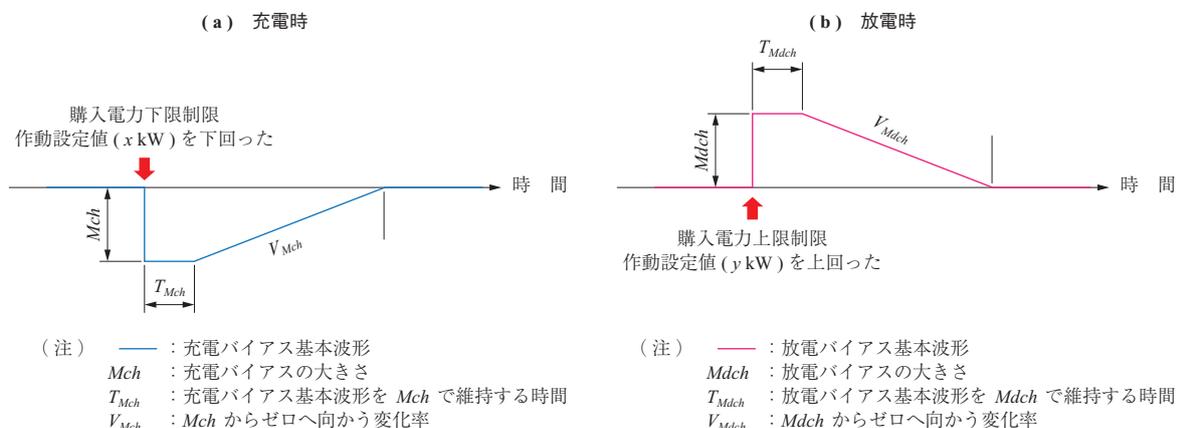
4.3 既設系統からの購入電力上下限の逸脱防止制御

SIGC では電力系統への逆潮流および購入電力の超過を防ぐため、4.2 節の PCS 台数制御に加え、購入電力に応じた充放電バイアス制御を行っている。第 6 図に充放電バイアス基本波形を示す。具体的には、PV 余剰電力増加などで購入電力量が下限設定値（第 5 図のレベル 0）を下回ると、一定時間、蓄電池の充電量にバイアスをかけ、購入電力を一時的に増加させる（第 6 図 - (a)）。なお、バイアスをかけた状態で再び購入電力下限値を下回る場合は新たなバイアス波形を印加し、先に印加したバイアス波形を加算する。

逆に購入電力量が上限設定値を上回ると、蓄電池の放電量にバイアスをかけ、購入電力を一時的に減少させ、購入電力の上限逸脱を防止する（第 6 図 - (b)）。こちらもバイアスをかけた状態で再び上限値を上回る場合、充電時と同様に新たなバイアス波形を印加し、先のバイアス波形と加算する。

4.4 PV 余剰電力の蒸気・水素への変換量制御

4.2 節では PV-PCS の段階制御による PV 出力抑制について説明した。しかしながら、PV-PCS を停止させた状態を長時間継続することは、PV で本来得られたはずの電力を破棄していることになるため、エネルギーマネジメントの観点からは好ましくない。LLC は、PV 電力が過剰



第 6 図 充放電バイアス基本波形
Fig. 6 Basic waveform for charging/discharging bias – under charging

な場合、グリッド内の設備負荷（水電解装置・電気ボイラの消費電力）を自動的に増加させ、積極的に PV 電力を別のエネルギー媒体（水素・熱）に変換・蓄積している。

SIGC 内の設備（水電解装置・電気ボイラ）負荷は、第 4 図の負荷計算部によって計算される。システム内部での電力バランスを考えると、以下の(1)式が成り立つ。

$$P_{\text{buy}} + P_{\text{pv}} = P_{\text{load}} + P_{\text{d}} + P_{\text{bat}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

- P_{buy} : 購入電力
- P_{pv} : PV 実発電電力
- P_{load} : 設備負荷電力
- P_{d} : 需要家消費電力
- P_{bat} : 蓄電池充放電電力（充電：正，放電：負）

この(1)式を基にして、負荷計算部では、以下のように設備負荷目標値 $P_{\text{load}}^{\text{ref}}$ を決定している。

$$P_{\text{load}}^{\text{ref}} = P_{\text{buy}} + P_{\text{pv-index}} - P_{\text{d}} - P_{\text{bat}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $P_{\text{pv-index}}$ は日射量から算出される PV が出力可能な最大電力（PV 発電能力指標）であり、実際の PV 電力ではないことに注意されたい。 P_{pv} は PV-PCS による台数制御の影響を受けるため、 P_{pv} そのものから PV で抑制されている余剰電力を推定できない。そのため、LLC では、 P_{pv} ではなく、 $P_{\text{pv-index}}$ を基に、設備負荷を決定している。なお、SIGC における主な需要家は下水処理場であり、 P_{d} は P_{pv} に比べ安定しているため、負荷計算部の P_{d}

には固定値を設定している。

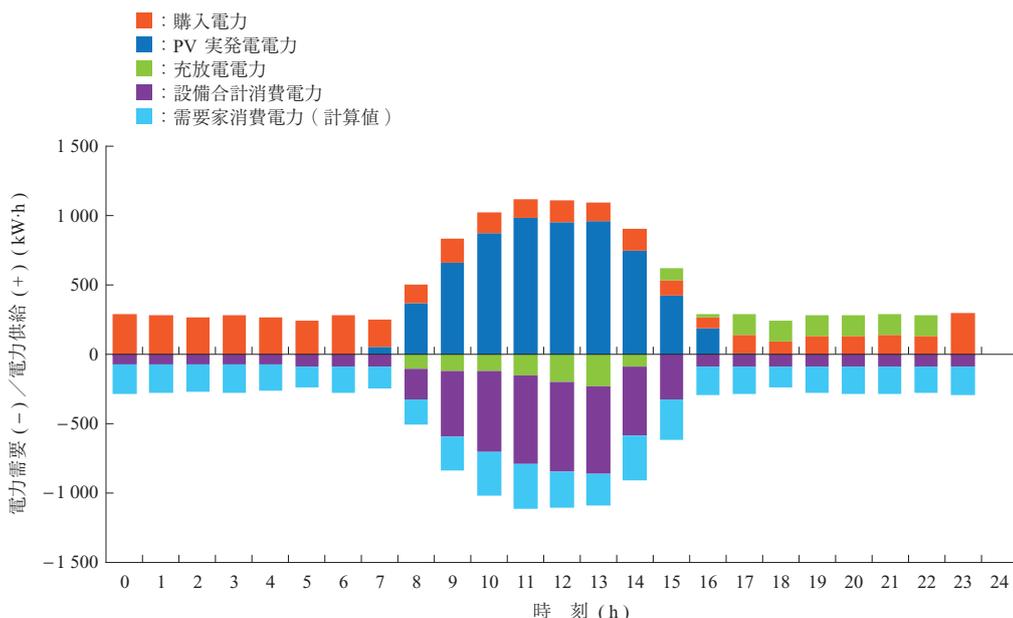
負荷計算部の出力である設備負荷目標値は、電気ボイラ・水電解装置の定格消費電力の比や、水素需要・熱需要などをもとに、負荷分配され、各指令値がそれぞれの装置の制御器に伝達される。このように、LLC は購入電力量をもとに、PV 余剰電力を蓄電池のみならず、蒸気・水素といったエネルギー媒体に変換・貯蔵できる。

5. 実際の設備負荷制御の動き

実際の SIGC における LLC 制御の結果を紹介する。第 7 図は 2019 年 2 月 7 日の SIGC における 1 日の電力需給バランスの推移を 1 時間単位で示したものである。電力需要側を下部に、電力供給側を上部に並べて表示している。また、図中の設備合計消費電力とは、電気ボイラ、水電解装置の消費電力の合算値である。

第 7 図の充放電電力に注目すると、日中の PV の余剰分を蓄電し、日没後に放電することで、エネルギーシフトを行っていることが分かる。また、PV 実発電電力の増加に伴い、設備合計消費電力を増大させて、系統内の電力需給バランスを維持していることも分かる。さらに、購入電力は安定して約 100 kW 以上を維持しており、既存系統への逆潮流が発生していないことが分かる。

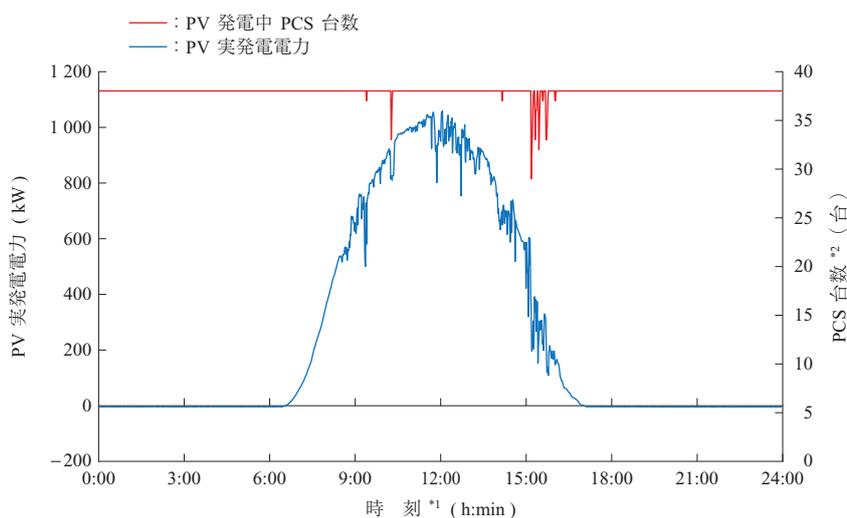
第 8 図は、同日の PV 実発電電力と PV-PCS 稼働台数（最大 38 台）を 1 分単位で示したものである。日中、一部の時間帯に PV-PCS が数台停止しているが、すぐに稼



(注) 2019 年 2 月 7 日の SIGC における 1 日の電力需給バランスの推移

第 7 図 電力需給バランス

Fig. 7 Power supply/demand balance at SIGC



(注) *1: 2019年2月7日, SIGCにて
*2: 最大38台

第8図 PV実発電電力とPCS稼働台数
Fig. 8 Actual PV power generation and PCS operation number

働台数を回復させており、PV抑制を最小限に収めていることが分かる。

以上のデータから、LLCは、マイクログリッド内で発生した余剰なPV電力を、蓄電池や電気ボイラ・水電解装置を統合制御することで有効活用し、再エネの地産地消を実現していることが明らかである。

6. 結 言

本稿で紹介した地産地消型EMSの中核であるLLCによって太陽光発電、蓄電池、余剰電力やその他負荷を統括制御することで、SIGCでは再エネの地産地消を完全に実現している。今後、大量の再エネ、特に変動性再生可能エネルギーが増加すると、系統の容量の問題などによる導入量の制限や、想定以上に出力制限がかかるケースなどが想定できる。そのような場合でも本EMSを展開することで既設系統に影響を与えることなく再エネの拡大を実現できる。よって筆者らは、本EMSが今後の再エネ拡大の問題に対する一つの解決策になると考えている。

— 謝 辞 —

本稿は、経済産業省「スマートコミュニティ導入促進事業」および福島県「地域復興実用化開発等促進事業」

の支援を受け構築し、得られた成果の一部をまとめたものです。相馬市をはじめとする関係各位のご厚誼^{こうぎ}に対し、ここに記し深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省資源エネルギー庁：再エネの大量導入に向けて～「系統制約」問題と対策，2017-10-05，<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/saiene/keitouseiyaku.html>，（参照2019.9.26）
- (2) 認定NPO法人環境エネルギー政策研究所：2018年（暦年）の国内の自然エネルギー電力の割合（速報），2019年4月，<https://www.iseip.or.jp/archives/library/11784>，（参照2019.9.26）
- (3) 株式会社IHI：地産地消システムによるエネルギー循環型社会の幕開け，IHI技報，Vol.58，No.2，2018年6月，pp.4-7
- (4) 高井紀浩：相馬市で展開する再エネ地産地消型スマートコミュニティの概要，配管技術，2019年4月号
- (5) 福島県相馬市：相馬市マスタープラン2017，第3編第6章第1節「環境保全体制の整備と低炭素社会の推進」，2017年12月