

蓄電池併設型太陽光発電用パワーコンディショナ 「三相ラインバックマイスター」の開発

Development of Power Conditioner with Batteries for Photovoltaic Generation System “Three phase LINEBACK MEISTER”

本郷 真一* 栗坂 昌克* 佐藤 美澄* 山口 明日輝*
横山 昌央* 篠田 雄作* 遠藤 浩輝*

Shinichi Hongo Masakatsu Kurisaka Misumi Sato Asuki Yamaguchi
Masao Yokoyama Yusaku Shinoda Hiroaki Endo

Abstract

“LINEBACK MEISTER” is a three-phase grid-connected power conditioner that can be connected to both batteries and a photovoltaic output. Two types of output capacities, 10 kVA and 20 kVA are prepared. It can be used back-up, peak-cut applications. Furthermore, it is also equipped with a network card that enables comprehensive control of photovoltaic output, battery and load, so it can be applied to Energy Management Systems, self-consumption system and Virtual Power Plant applications. “LINEBACK MEISTER” has a compact structure, various charge modes and battery capacity line-up making it possible to meet the various customer configurations.

Key words : Peak-cut operation; Energy management system; self-consumption system

1 まえがき

2020年10月、政府は二酸化炭素など地球温暖化につながるガス排出量を2050年に実質ゼロにするカーボンニュートラルの目標を掲げた。目標達成に向けて策定した「グリーン成長戦略」で、住宅や建築物では2030年までにCO₂排出量を新築平均で実質ゼロにする目標を設定した^{1,2}。2012年から地球温暖化対策や国土強靱化対策として、主に避難所や防災拠点

となる文教施設・福祉施設・行政施設に自家消費型太陽光発電（PV）や定置用蓄電池（ESS）を組合せた自立・分散型エネルギーシステムの導入が進められており、SDGsやESG投資、BCP対策などを背景に事務所・店舗・物流倉庫・工場・共同住宅などの民間施設にも導入が拡大している。近年では、エネルギーマネジメントシステム（以下、EMS）による再生可能エネルギーの有効活用や、分散型電源を統合的に制御することで一つの発電所のように利用するバーチャルパワープラント（以下、VPP）といった、次世代の電力マネジメント技術が注目を集めている。これらを実現するには、電力貯蔵の技術が不可欠であり、蓄電池併

* 産業電池電源事業部 電源システム生産本部
開発部 第一グループ

設システムの必要性が高まっている。

当社はこれまでに、蓄電池を搭載した太陽光発電用パワーコンディショナ（以下、PCS）として、「パワーソーラーシステム」や「単相ラインバックマイスター」を開発してきたが^{3,4,5,6,7,8}、これらは単相出力のPCSであり、防災拠点として必要となる受水槽用ポンプやマンション等のエレベータには適用できないものとなっていた。今回新たに、三相負荷のバックアップが可能となる三相連系中容量帯向けの高機能製品として、蓄電池併設型太陽光発電用PCS「三相ラインバックマイスター（以下、LBマイスター）」を開発し、公共施設や避難所、高齢者施設等でライフラインの確保が可能となるラインアップを拡充した。本報告では、「三相LBマイスター」の製品概要について述べる。

2 外観および仕様

「三相LBマイスター」は、太陽電池と蓄電池との停電時の自立運転機能だけでなく、節電対策に利用可能なピークカット機能や電力の需給バランスを調整するエネルギーマネジメント機能を備えている。また、固定価格買取制度（FIT制度）の終焉に伴い活発化している自家消費市場に対応するべく、専用の外付け機器なしで自家消費が可能となるモードを搭載している。細かな充放電設定やEMS機能を用いることで、より高度なVPP用途としても活用することができる。出力容量は10kVAと20kVAの2機種、蓄電池容量は17.6kWh、35.3kWh、53.0kWhの3種類のシステムをラインアップしており、リチウムイオン電池は「LIM50EL」を搭載している。

「三相LBマイスター」の外観、寸法および仕様をそれぞれFig. 1, Table 1およびTable 2に示す。主回路変換素子は、これまで一般的に使用されていたSiチップのIGBTから、スイッチング損失の少ないSiCチップを用いたFETを採用し、定格運転時の電力変換効率は業界最高効率となる95.0%、最高効率96.5%を実現している。正面の液晶タッチパネルを用いた表示器では、太陽電池発電電力や蓄電池充電量などの状態確認をはじめ、設定確認や設定変更、異常履歴確認などを簡単に操作可能な設計としている。

PCS盤は、系統停電時の主回路切替機能と三相三線出力機能に加え、単相出力用トランスを内蔵している。PCS盤は構造を新規設計し、最適な部材配置をおこなうことで、幅600mm（PCS盤のみ）のスリムな構造を実現した。これにより、PCS盤に別盤を追加



図1 「ラインバックマイスター」の外観
Fig. 1 Exterior of "LINEBACK MEISTER".

表1 外形寸法

Table 1 External dimensions of "LINEBACK MEISTER".

パワーコンディショナ盤				
出力容量	寸法 (mm)			
	幅 (W)	奥行 (D)	高さ (H)	
10 kVA および 20 kVA	600	800	1900	

蓄電池盤（リチウムイオン電池搭載、直列セル数 96）				
並列数	参考容量 (kWh)	寸法 (mm)		
		幅 (W)	奥行 (D)	高さ (H)※
1	16.8	400	800	1900
2	33.7	800	800	1900
3	50.6	1000	800	1900

※チャンネルベースは含まず

して切替回路を設置する場合と比べて、設置床面積を約40%削減した（蓄電池盤寸法を含まず）。また、機器のメンテナンスは全て前面からアクセス可能な構造としたことにより、側面および背面の設置保有距離を不要とし、柔軟な配置設計を可能とした。

表2 パワーコンディショナの仕様
Table 2 Specifications of power conditioner.

項目	標準仕様	
出力容量	10 kVA または 20 kVA	
方式	インバータ 電力制御 絶縁 冷却	電圧型電流制御（連系時）/ 電圧型電圧制御（自立時） 最大電力追従制御（太陽電池）, 逆潮流防止制御（蓄電池放電時）, 定電流定電圧定電力制御（蓄電池充電時） 非絶縁（トランスレス） 強制風冷
直流入力	定格電圧 直流電圧範囲 最大電力追従範囲	400 V 0 V ~ 650 V 200 V ~ 550 V
交流出力	相数 定格電圧 定格周波数 電力変換効率 出力基本波力率	三相 3 線（V 相接地） 202 V 50 Hz または 60 Hz 95.0% 95%以上 5%以下（総合），3%以下（各次）
連系保護機能		過電圧 (OV), 不足電圧 (UV), 過周波数 (OF), 不足周波数 (UF)
単独運転検出	受動的方式 能動的方式	周波数変化率方式 ステップ注入付周波数フィードバック方式
自立運転出力	出力容量 定格周波数 相数 定格電圧 定電圧精度 周波数精度 電圧波形歪率	10 kVA または 20 kVA（負荷合計は出力容量以下） 50 Hz または 60 Hz 三相 3 線, 単相 3 線 202 V, 101 V ± 12 V 以内（定格出力 202 V 時）, ± 6 V 以内（定格出力 101 V 時） ± 0.1 Hz 以内 総合 5%以内
蓄電池	モジュール形式 蓄電池容量	LIM50EL シリーズ 17.6 kWh（1 並列時） 35.3 kWh（2 並列時） 53.0 kWh（3 並列時）
使用環境	周囲温度 相対湿度 高度 設置場所	-10°C ~ 40°C 10 ~ 90% 海拔 0 ~ 1000 m 屋内（有毒ガス・ほこりの少ない所, 塩分のない所, 居住空間を除く）

3 回路構成とシステム概要

「三相 LB マイスター」の回路構成を Fig. 2 に示す。太陽電池用と蓄電池用とに独立したコンバータを搭載しており、太陽電池の最大電力追従制御をおこないながら、蓄電池の充放電を制御することができる。搭載された系統保護機能により、安全な系統連系をおこなうとともに、系統停電時には自動的に回路が切り替わり、非常用特定負荷（三相 200 V 負荷および単相 100 V 負荷）を利用することが可能である。回路構成および構造は、10 kVA 仕様と 20 kVA 仕様の共通化やメンテナンス等の作業性を意識して設計し、部材共用化や電力変換部や電解コンデンサ部のユニット化を実現している。主要部材である SiC-FET は先に開発した「ラインバック α IV」^{9,10} と同一品を用いるこ

とで、納期短縮やコストダウンに寄与する とともに、高い品質・信頼性を継承している。

太陽電池と蓄電池の電力制御機能は、すでに商品化している「ラインバック Σ III」と「パワーソーラーシステム III」双方の機能を備えており、内蔵している受電電流検出センサで検出した受電電力をもとに、設定された動作モードに応じて蓄電池を最適に充放電する制御と、外部機器からの指令値通りに動作する制御とを選択することができる。設定により、「停電対応システム」、「ピークカットシステム」および「エネルギーマネジメントシステム」の 3 種類のシステム用途に対応することができ、蓄電池の充放電運転は、内部タイマーや外部入力を用いることで、予め設定された時間や任意のタイミングで開始することができる。さらに太陽光で発電した電力を系統に逆潮流せず、す

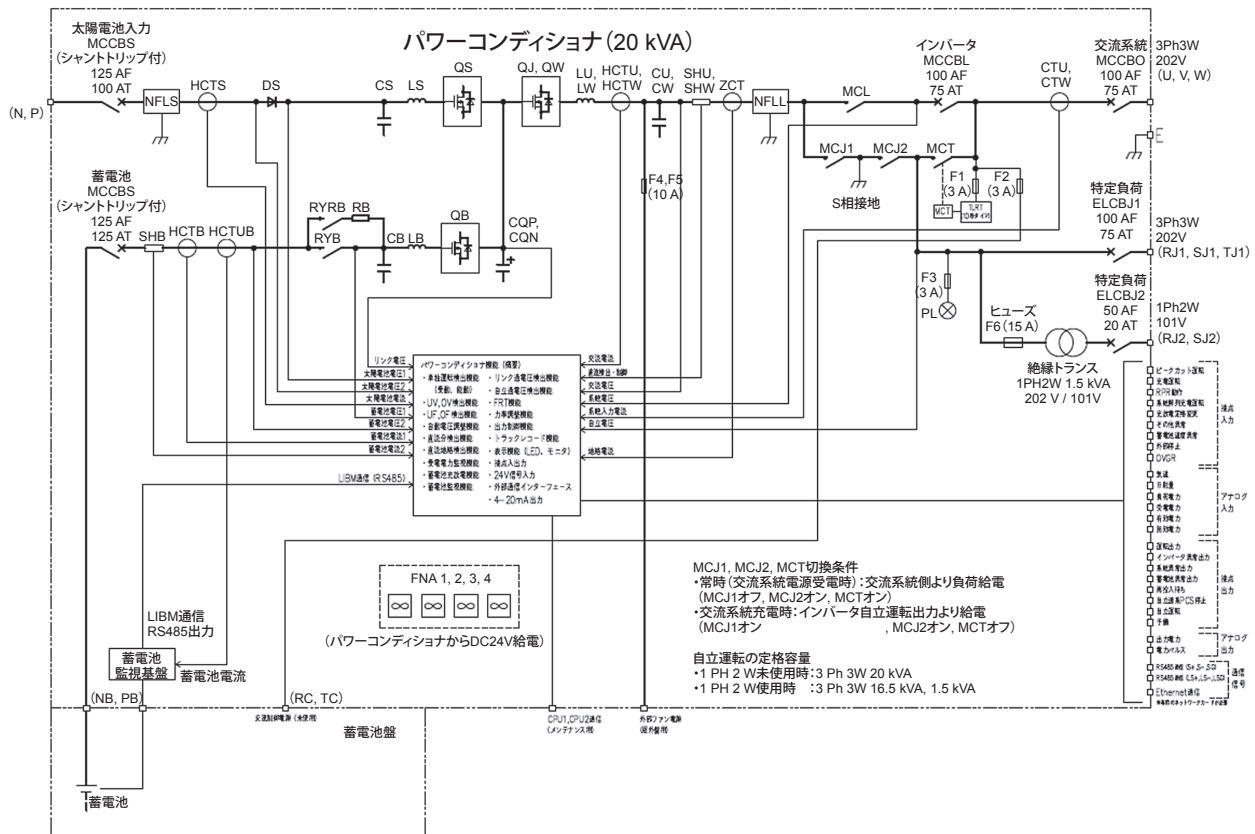


図2 ラインバックマイスター回路構成
Fig.2 Circuit configuration of "LINEBACK MEISTER".

べて負荷で消費する「自家消費モード」により、買取価格が著しく低下している太陽光の発電電力を有効に活用することが可能となる。「単相 LB マイスター」の商品化時に新規開発した「系統解列充電機能」も標準で搭載しており、蓄電池の充電を太陽電池電力のみでおこなうことも可能となる。

以下、「停電対応システム」、「ピークカットシステム」、「エネルギーマネジメントシステム」および「自家消費モード」について詳しく述べる。

3.1 停電対応システム

「三相 LB マイスター」は、停電時に特定の負荷へ電力を供給することができる自立運転機能を搭載している。蓄電池の搭載により、雨天や夜間など、太陽電池が十分に発電できない状況で停電した場合においても、PCS の定格容量まで電力を安定に供給することができる。

Fig. 3 および Fig. 4 に、停電対応システムにおける電力系統健全時と停電発生時の電力フローイメージをそれぞれ示す。Fig. 3 に示すように、電力系統が健全な場合は、昼間は一般的な太陽光発電システムとして

動作し、任意の設定時間 (Fig. 3 では夜間) に充電することで自己放電を補い蓄電池の充電状態を維持して停電に備える。Fig. 4 に示すように、系統が停電した場合は、自立運転をおこない、太陽電池発電電力に対して負荷の使用電力が小さい場合は余剰電力を蓄電池に充電し、大きい場合は不足電力を蓄電池から放電する。系統が復電した場合は、自立運転を停止し、安全に連系運転に移行する。復電後、次の停電に備えて蓄電池を充電する機能も有している。

3.2 ピークカットシステム

「三相 LB マイスター」は、内部タイマーまたは外部機器からの接点信号を用いて、あらかじめ設定された時間や任意のタイミングにて設定電力で交流出力を開始するピークカット運転機能を搭載している。Fig. 5 にピークカットシステムにおける電力フローイメージを示す。

ピークカット運転時は、蓄電池の放電電力を制御して、太陽電池の発電電力に関わらず設定電力を安定に出力する。設定電力に対して太陽電池電力の発電量の方が大きい場合は、放電動作から充電動作に運転を停



図3 停電対応システムの電力フローイメージ（電力系統健全時）
Fig. 3 Power flow image of back-up application system (during normal grid operation).

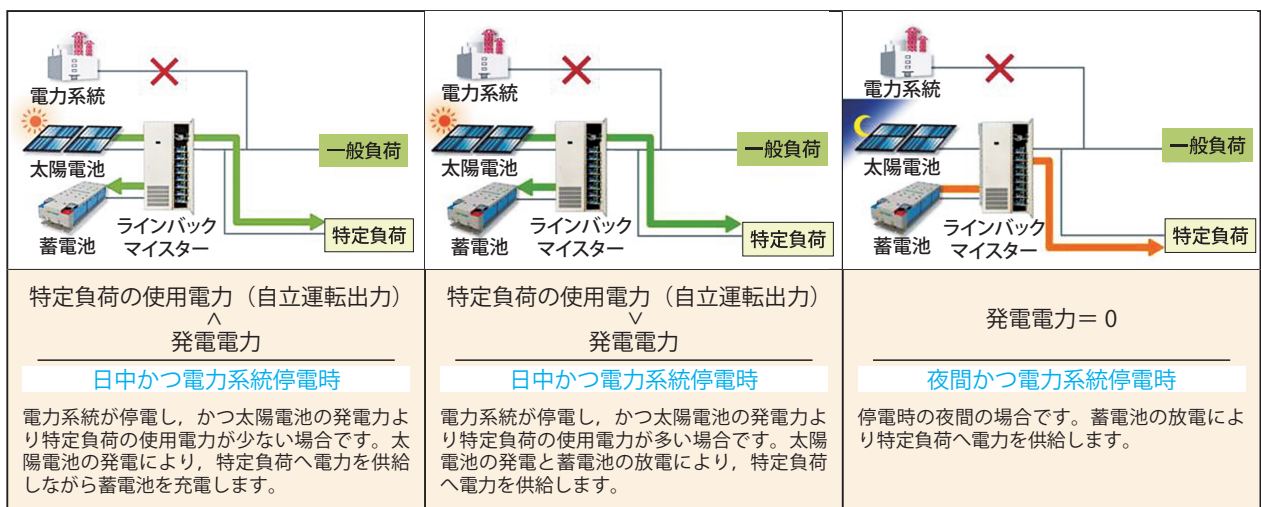


図4 停電対応システムの電力フローイメージ（停電発生時）
Fig. 4 Power flow image of back-up application system (during grid power failure).

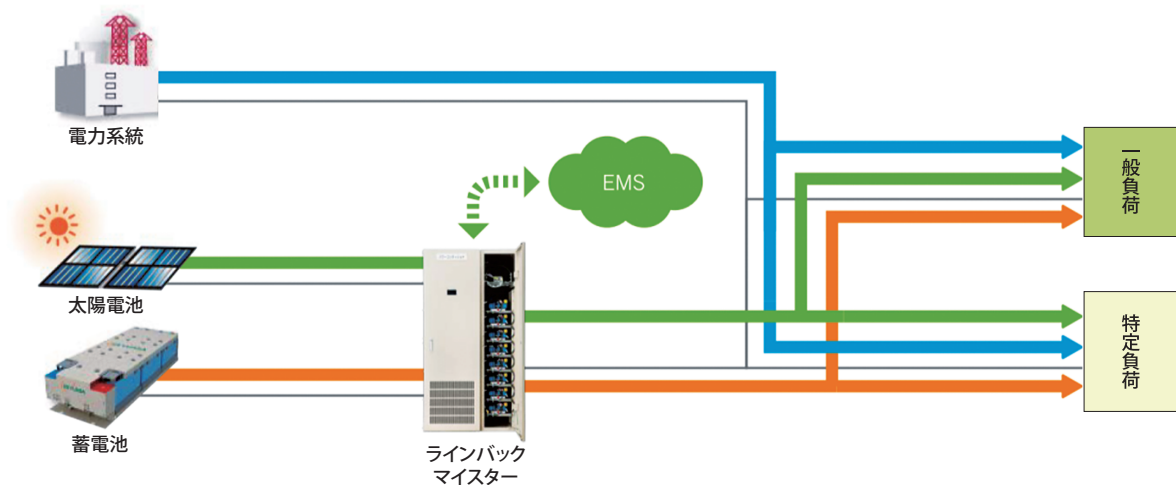


図5 ピークカットシステムの電力フローイメージ
Fig. 5 Power flow image of peak-cut system.

止することなく移行し、発電電力の余剰分を有効に利用することができる。Fig. 6 にピークカットシステムによる受電電力抑制のイメージを示す。図のように、電力デマンド逼迫時にピークカット運転をおこなうことで負荷へ電力を供給し、受電電力のピーク抑制が可能となる。なお、蓄電池からの電力系統への逆潮流は禁止されているため、必要に応じて逆電力継電器などの設置が必要となる。

3.3 エネルギーマネジメントシステム

「三相 LB マイスター」では、外部の EMS 機器と通信をおこない、上位からの指令通りに電力をやり取りすることで系全体の電力需給バランスを調整するエネルギーマネジメント運転機能を搭載している。上位との通信プロトコルは、ECHONET Lite, Modbus TCP に対応しており、インターフェイスに当社製のネットワークカード（以下、NIC）を使用することで、フレキシブルな対応が可能となる。ECHONET Lite については、ECHONET コンソーシアムが発効している認証を太陽電池クラスおよび蓄電池クラスの双方で取得しており、汎用性の高い HEMS コントローラとの通信も可能としている。NIC を搭載することで電力会社が義務付けている遠隔出力制御にも対応可能であり、ECHONET Lite との共存も可能である。また、Modbus TCP にも対応することで、家庭向けが主軸の HEMS

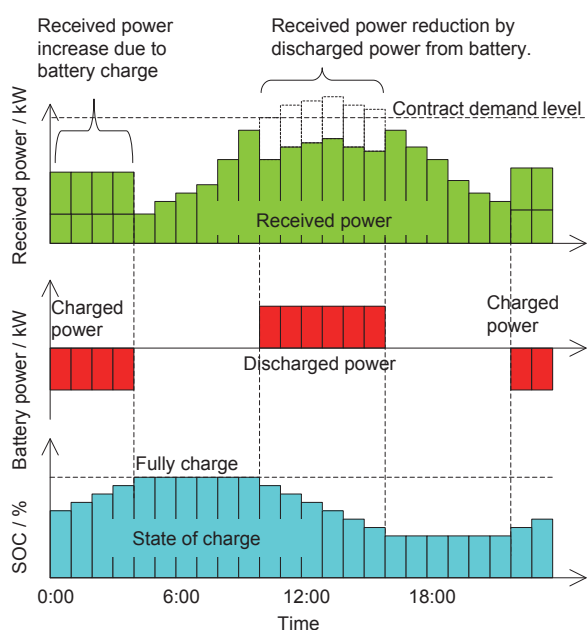


図6 ピークカットシステムにおける消費電力のカットおよびシフトイメージ

Fig. 6 Cutting and shifting image of power consumption in peak-cut system.

コントローラでカバーしきれない産業用途にも適用でき、よりきめ細やかな電力制御が可能となる。

3.4 自家消費モード

FIT 制度の終焉と共に太陽光で発電した電力の買取価格が著しく低下しており（買取価格：2012年度 40 円 / kWh → 2020 年 13 円 / kWh），発電した電力を系統に逆潮流するより、自己の負荷で使用する方が賢明となっている。自家消費モードでは、太陽光で発電した電力が系統へ逆潮流しないように PCS が制御するもので、蓄電池が動作可能な状態であれば、太陽電池電力のみで発生した余剰分を蓄電池に充電し、負荷が太陽電池電力よりも大きくなった時に蓄電池が放電する。その際、PCS は受電電力制御機能（蓄電池の電力が系統に逆潮流しないよう系統から僅かに受電する制御）により蓄電池電力が系統へ出力することを防止している。また、太陽電池電力の余剰分を全て蓄電池に充電できない場合、充電余剰分が逆潮流しないように太陽電池電力を抑制する。これにより、専用の外付け機器なしで自家消費への対応が可能となる。

4 動作特性と実証試験結果

「三相 LB マイスター」の定格入出力条件（20 kVA 仕様）における、太陽電池の発電電力を交流電力に変換した場合の出力力率および電力変換効率の特性を Fig. 7 に示す。図より、出力容量の 100% 出力時に電力変換効率 95.0% を達成しており、50% ~ 100% 出力の範囲で最大効率が見られる特性であることがわか

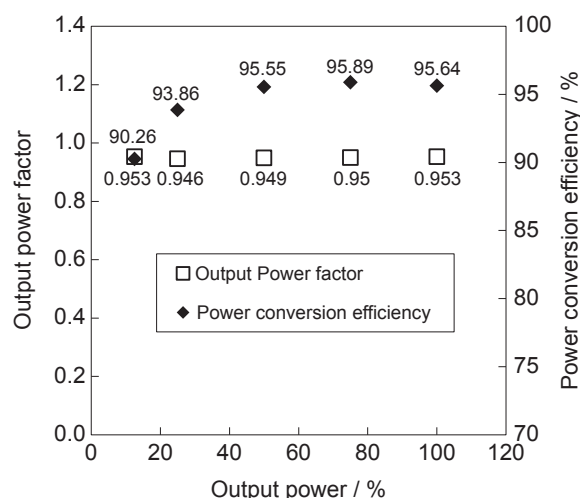


図7 出力に対する効率および力率

Fig. 7 Output power factor and power conversion efficiency for output power.

る。蓄電池充放電においても同程度の変換効率を実現しており、各電力変換時に発生する損失を抑えていることを示す結果である。

つぎに、新機能となるエネルギーマネジメント運転機能と、自家消費モードの動作検証結果を示す。Fig. 8に動作検証に用いたシステム構成図を示す。エネルギーマネジメント運転機能を用いて有効電力制御と無効電力制御をおこなった際の各電力波形をFig. 9, Fig. 10に示す。なお、制御する対象は交流電力である。Fig. 9は無効電力指令0kVarにおいて有効電力制御をおこなった結果であり、有効電力指令を出力方向(+20 kW)から入力方向(-20 kW)に変化させている。指令に合わせて太陽電池の発電電力が抑制されるとともに、蓄電池が充電動作をおこなうことで交流電力が指令通りに制御されていることが分かる。Fig. 10は無効電力指令0 kWにおいて無効電力制御をおこなった結果であり、無効電力指令を発電機側からみて遅相方向(+20 kVar)から進相方向(-20 kVar)に変化させている。有効電力が0 kWのため、太陽電池電力を全て蓄電池に充電することで交流出力を0 kWに保ったまま、無効電力指令に合わせて交流電流の向きをシームレスに変化させられていることが分かる。これらの電力制御を組み合わせることで、システムに合わせた電力制御を実現することが可能である。また、ここで紹介した制御に加え、力率制御および蓄電池電力制御をおこなう機能も搭載している。

自家消費モードを用いて負荷への給電をおこなった際の各電力波形をFig. 11に示す。ここでは、負荷電力10 kWに対して、太陽電池発電電力が20 kWの場合は余剰分の10 kWを蓄電池に充電し、太陽発電電量が0 kWの場合は受電電力を一定値以上増やさないように蓄電池を放電すること負荷への給電がおこなわ

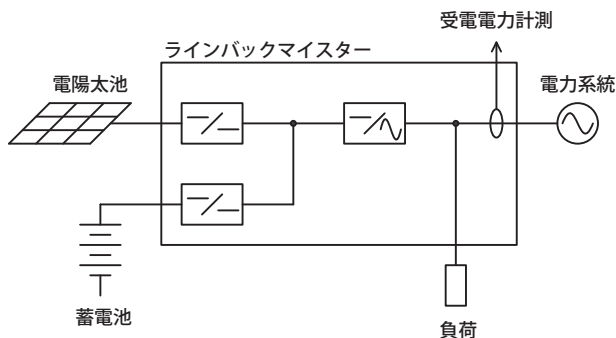


図8 システム構成図
Fig. 8 System diagram.

れていることが分かる。また、蓄電池が太陽電池発電電力の余剰分を全て充電できない場合に充電余剰分を抑制する動作を検証した結果がFig. 12である。Fig. 12は太陽電池電力の余剰分を蓄電池に充電させ続け

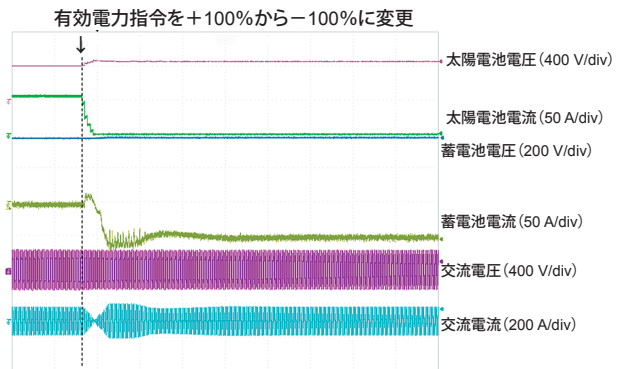


図9 有効電力指令に対する応答特性
Fig. 9 Response characteristics to active power commands.

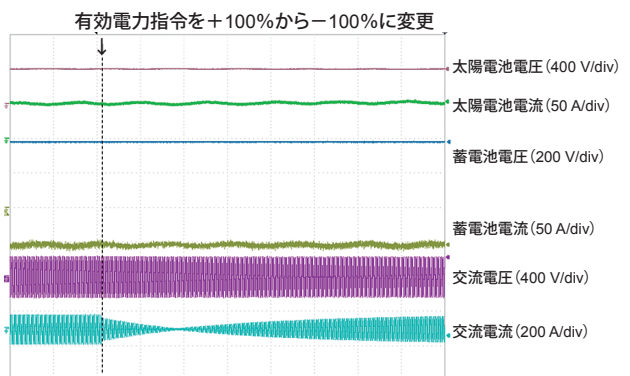


図10 無効電力指令に対する応答特性
Fig. 10 Response characteristics to invalid power command.

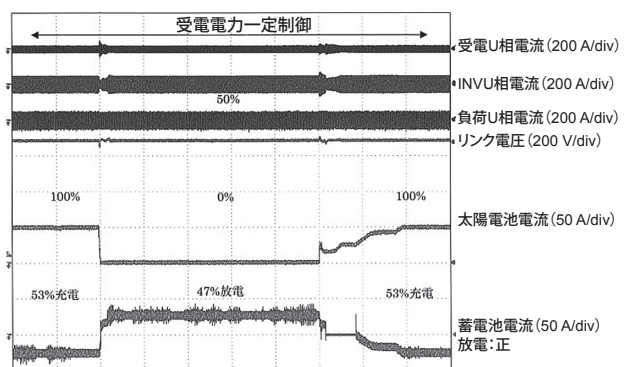


図11 自家消費モードの動作波形
Fig. 11 Operation waveform of self-consumption mode.

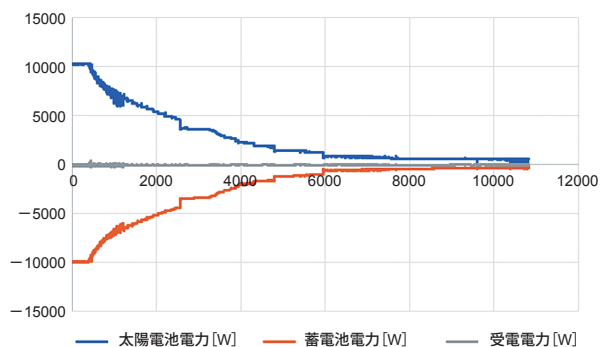


図 12 自家消費モードの蓄電池充電制限時の電力制御

Fig. 12 Power control when charging of storage battery in self-consumption mode is limited.

て満充電付近に到達した際、充電電力の制限に合わせて太陽電池発電電力を抑制することで受電電力が負（逆潮流方向）にならないことを示した結果である。これら結果から、自家消費モードを用いることで、受電電力を抑制しつつ、太陽電池余剰電力を逆潮流させない自家消費システムを実現することができる。

5 まとめ

蓄電池併設型太陽光発電用パワーコンディショナ「三相ラインバックマイスター」を開発した。本製品では、SiC-FETを用いた高い電力変換効率と、太陽電池および蓄電池の最適制御によって、太陽電池電力の有効活用が可能となった。また、これまでの「停電対応システム」、「ピークカットシステム」に加えて「エネルギーマネジメントシステム」への対応を実現することによって、上位指令に基づいたフレキシブルな電力制御が可能となり、系統安定化やVPPといったエネマネ市場にも適用可能となった。さらに、太陽光の発電電力を系統へ逆潮流せずに、自己の負荷で使用する「自家消費モード」を設けたことにより、卒FITとして注目される自家消費市場にも標準で対応することが可能になった。

「三相ラインバックマイスター」を開発したことによって、当社のEV充電器「VOXSTAR」、ネットワークカード「RX-02」および定置用蓄電池「LIM50EL」を融合させたV2Xシステム（Vehicle to Everything System）を構築することが可能となる。オールGSユアサでのV2Xシステムは、カーボンニュートラルの実現に向け必要不可欠とされている「再エネ：PV」「蓄電：ESS」「電化：EV」を具現化す

るシステムであり、今後のEV社会を見据えた必須アイテムになる。再生可能エネルギーの普及拡大と共に、系統安定化に関する新たな取り組みや、より柔軟な自家消費システムへの対応、分散型電源を統合管理する制御といったシステム全体を考慮した製品の必要性は益々高まっているため、今後も市場ニーズに貢献できる製品開発をおこなっていく。

文献

1. 首相官邸ホームページ https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html
2. 環境省ホームページ http://www.env.go.jp/earth/2050carbon_neutral.html
3. 新製品紹介「パワーソーラーシステムⅢ」, *GS YUASA Technical Report*, **12**(1), 26 (2015).
4. 栗坂昌克, 横山昌央, 吉岡佑介, 上野勉, 長野友幸, 遠藤浩輝, *GS YUASA Technical Report*, **14**(1), 20 (2017)
5. H. Endo, M. Kurisaka, M. Yokoyama, Y. Yoshioka, T. Ueno, K. Inoue, T. Kato, "A Study on Improvement of Power Utilization Rate of Energy Systems with PVs and Batteries" International Power Electrics Conference 2018, published in IPEC 2018 (DOI : 10.23919 / IPEC.2018.8507474)
6. 遠藤浩輝・吉岡佑介・井上馨・加藤利次, 「蓄電池併設型太陽光発電用パワーコンディショナにおける受電点の潮流に応じた力率制御に関する研究」, 電気学会論文誌D, Vol. 139, No. 1, pp. 51-59, 2019
7. 遠藤浩輝・横山昌央・井上馨・加藤利次, 「蓄電池併設型PCSの受電電力可変制御を用いたDR対応とEMSへの適用」, パワーエレクトロニクス学会論文誌, Vol. 45, 2020
8. 遠藤浩輝・横山昌央・井上馨・加藤利次, 「蓄電池併設型太陽光発電用パワーコンディショナの受電電力可変制御を用いたEMSに関する研究」, 電気学会論文誌D, Vol. 140, No. 5, pp. 1-7, 2020
9. 遠藤浩輝, 詫間隆史, 水川雄太, *GS YUASA Technical Report*, **13**, 19 (2016).
10. 林健太郎, 遠藤浩輝, 水川雄太, 篠田雄作, 詫間隆史, 「SiCデバイスを用いた高効率な太陽光発電用パワーコンディショナの開発」 パワーエレクトロニクス学会第215回研究会, JIPE-42-15