

一 般 論 文

太陽光・蓄電ハイブリッド パワーコンディショナシステムの技術開発

A hybrid photovoltaic power conditioning system with lithium polymer battery

蓑 輪 義 文*
Y. Minowa

長 瀬 只 雄*
T. Nagase

松 川 満*
M. Matsukawa

北 祐 太 郎**
Y. Kita

概 要

分散電源用途として太陽光発電、夜間電力蓄電の両機能をハイブリッド化した機能を持つパワーコンディショナシステムを開発した。本システムの適用により、太陽光発電電力を最大限利用しながら、夜間電力を有効活用することで、設置者にとっては電気料金低減、電力会社にとっては昼夜電力需要の平準化が期待できる。

また、本システムを構成しているDC-DCコンバータの高効率化を図ったので、その原理・性能について報告する。

Synopsis

In this paper, a hybrid photovoltaic power conditioning system with lithium polymer battery is presented. This system is expected to reduction of electricity rates for the establishment and demand for power equalization of day and night for the power company by using the most of photovoltaic power and utilizing the power at night effectively.

An experimental implementation shows the efficiency of the proposed converter higher than 97.8% at maximum. The principle and control method of this DC-DC converter system are introduced.

1. まえがき

近年、地球環境問題意識が高まる中、新エネルギー利用が進められており、なかでも太陽光発電システムの普及はめざましい⁽¹⁾。しかし今後、太陽光発電システムが集中的に導入されると、配電系統の電力品質に様々な悪影響を及ぼすことが懸念される⁽²⁾。その解決には、システム内部に蓄電機能をもたせることが、最も効果的な対策であると考えられる。しかし、蓄電機能を付加することは、コストアップの要因となり、システム設置者にとってメリットが出にくいのが一般的である。

本開発では、コストアップのデメリットを、夜間電力活用で補いながら、システム設置者および電力会社双方にとってメリットのある「太陽光・蓄電装置ハイブリッドシステム」を構築し、基本動作検証を行ったので、以下に報告する。

2. 太陽光・蓄電ハイブリッドシステム

2.1 システム適用メリット

本システムは、太陽光発電、夜間電力蓄電の両機能を併せ持ったパワーコンディショナシステムである。太陽光発電電力を最大限利用しながら、電力料金の割安な夜間電力を、昼間の需要家消費電力に有効活用しようとするものである。晴天時においては、需要家消費電力で消費しきれなかった太陽光発電余剰電力分を配電系統へ逆潮流し、需要家は、電力会社から逆潮流電力売電料金を得ることができる。曇天時や雨天時、太陽光発電電力が期待できない時には、需要家のほとんどの消費電力を夜間電力分で賄う。また、電力会社にとっては、昼夜電力需要の平準化が期待できることとなる。本システムの適用により、需要家の電気料金低減と昼夜間電力平準化が両立され、需要家および電力会社ともにメリットを生み出すことが可能となる。

本開発では、ハイブリッドパワーコンディショナお

* 技術開発研究所
** フジプレアム株式会社

よびリチウムポリマ電池を制御するバッテリー・マネジメント・システム開発を行った。

また、検証システムを構築し、システム評価および蓄電装置の運用効果等のフィールド検証を実施した。

2.2 蓄電装置容量の検討とコストメリット

2.2.1 夜間電力有効利用蓄電装置容量の検討

一般住宅の電力負荷パターン（日負荷曲線）と標準気象データ（METPV）⁽³⁾を用いたシミュレーションプログラムを作成し、最適な蓄電装置容量について検討した。

一般住宅の年間電力使用量は、5000kWh程度と考えられることから、入手データの中から年間電力使用量が4300kWh程度となるものを負荷パターン1、同じく6500kWhを負荷パターン2として使用した⁽³⁾。

そこで、夜間電力有効利用のために蓄電装置を用いた場合、夜間蓄えた電力の昼間時間帯への電力シフト状況について考察した。

図1は、3kW太陽電池と蓄電装置を持つシステムでの夜間蓄えた電力を昼間にシフトして昼間電力を賄うことができる比率（電力シフト率）と昼間電力量を示したものである。

昼間電力量は、各月および年平均1日あたりの昼間時間帯消費電力量から太陽電池充当分を差し引いたものとしている。

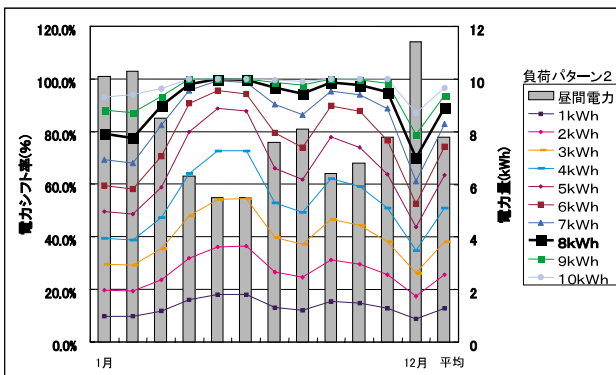
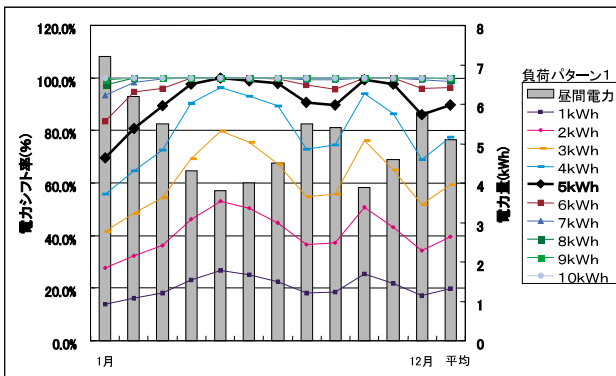


図1 蓄電装置容量と電力シフト率の関係（大阪の場合）
（上図：負荷パターン1 下図：負荷パターン2）

負荷パターン1では、10kWhの蓄電装置を設置することで昼間時間帯のほぼ100%の消費電力を夜間電力からシフト可能であることがわかる。年平均では、負荷パターン1で5kWhの蓄電装置容量があれば、90%の電力シフトが可能となる。

負荷容量を大きく想定した負荷パターン2の場合では、電力シフト率90%を満たすためには、8kWhの蓄電装置容量が必要となる。そこで、本開発システムでの夜間電力有効利用蓄電装置適用容量を8kWhとした。

2.2.2 夜間電力有効活用によるコストメリット

次に、8kWhの夜間電力有効活用蓄電装置を適用した本システムのコストメリットについて検討する。

検討には負荷パターン2（年間電力使用量6500kWh程度）を使用した。本検討では、夜間電力で蓄電装置を満充電とし、太陽電池出力の不足時や朝夕時間帯には、蓄電装置から放電し、蓄電残存容量が無い場合は商用電力を利用する。太陽電池からの余剰電力は充電とする。電力料金については、関西電力株式会社殿の時間帯電灯料金（2008年3月）を使用した。標準気象データは、METPV（大阪）を使用し、3kW太陽光発電システムからの発電量が年間3143kWhと想定している。

表1に本システム適用によるユーザコストメリットを示す。

同表から、太陽光発電システムを導入しない場合、年間電力料金は151,603円となる。3kW太陽光発電システム導入で53,182円、さらに夜間電力有効活用蓄電装置を持った本システムでは、4,176円まで電力料金の低減を図ることができる。本システムを導入することで年間147,427円のコストメリットを得ることができる。20年間では約295万円、30年間では約442万円のコストメリットが出る。蓄電装置を持たない

表1 本システムのユーザコストメリット

	電気料金	ユーザメリット		
		1年	20年	30年
PV無し	151,603円 ^{*1}			
3kWPVシステム	53,182円 ^{*2}	98,421円 ^{*4}	1,968,420円	2,952,630円
本システム	4,176円 ^{*3}	147,427円 ^{*5}	2,948,540円	4,422,810円

注) *1: 通常料金 (23.32円) × 年間電力使用量 (6501kWh)
 *2: 夜間時間帯料金 (7.22円) × 夜間電力量 (1849kWh)
 + 昼間時間帯料金 (26.39円) × 買電電力量 (2865kWh)
 - 昼間時間帯料金 (26.39円) × 充電電力量 (1355kWh)
 *3: 夜間時間帯料金 (7.22円) × 夜間電力量 (1849kWh)
 + 昼間時間帯料金 (26.39円) × 買電電力量 (309kWh)
 - 昼間時間帯料金 (26.39円) × 充電電力量 (1355kWh)
 + 夜間時間帯料金 (7.22円) × 蓄電池充電電力量 (2556kWh)
 *4: *1 - *2
 *5: *1 - *3

3kW太陽光発電システムの場合に対しても、100～150万円程度のコストメリットを得ることができる。

2.2.3 太陽光発電電力出力変動抑制用蓄電装置容量の検討

太陽光発電では、日射の急変による出力変動が発生する。系統連系された太陽光発電システムでの出力変動は、電力系統に電圧変動、周波数変動の悪影響を及ぼすことが懸念される⁽⁴⁾。電力系統への悪影響を緩和するため、太陽光発電電力出力変動を抑制し、出力平滑化を図っておく必要がある。

太陽電池出力を計測しながら任意の時定数での移動平均処置を行う。その移動平均値と太陽電池出力との差分を蓄電装置からの充放電電力で補正し、平滑化を図る。本開発では2kWhの蓄電装置を適用した。

太陽電池出力を10msecごとに計測し、任意の移動平均時間での移動平均処置を行い、変動分の平滑化効果について検討した。

変動分を抑制するために必要となる蓄電装置からの充放電電力は、移動平均時間3秒では最大500W、同時間10分では最大1.3kWであった。蓄電装置から入出力される電力量では、数十Wh以下の容量の少ない蓄電装置でよい。

しかし、瞬時に出力変動を抑制する必要があることから、蓄電装置の充放電レートを1Cとした場合、各々500Wh、1.3kWh以上の蓄電容量が必要であることがわかった。

2.3 ハイブリッドパワーコンディショナの開発

2.3.1 システム構成

図2にシステム構成を示す。本システムは、定格容量5kWの系統連系インバータ、3kWの太陽光発電電圧昇圧チョッパ、2kWの夜間電力充放電用コンバータ、1kWの太陽光発電電力出力変動抑制用コンバータ、機械式開閉器及び受電電力監視システムにて構成している。

インバータ(INV)は単相インバータ構成とし、INV入力電圧を一定に制御する。

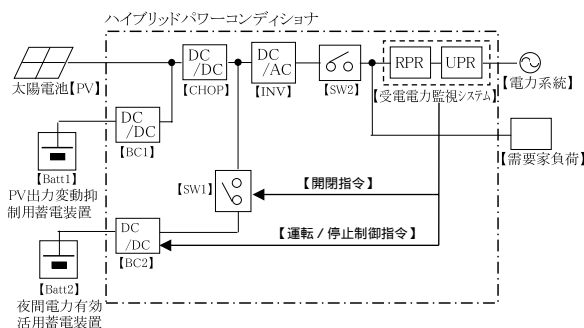


図2 システム構成図

太陽光発電電圧昇圧用チョッパ回路(CHOP)では、最大電力追従(MPPT)制御を行い、後述するソフトスイッチングによる低損失化を図っている。

太陽光発電電力出力変動抑制用バッテリーコントローラ1(BC1)および夜間電力充放電用バッテリーコントローラ2(BC2)は、双方向チョッパ回路を採用している。BC2はCHOP同様、ソフトスイッチングによる低損失化を図り、蓄電装置の充放電制御(放電時:昇圧、充電時:降圧)を行っている。

受電電力監視システムは系統連系保護機能、逆潮流監視機能、受電電力計測機能及びデータ通信機能を有している。さらに、需要家の消費電力および逆潮流電力を計測し、BC2に買電最小制御や運転/停止制御等のトータルマネジメントのための情報を提供する。

SW1は、太陽光発電余剰電力の逆潮流時に、Batt2からの放電電力を確実に遮断するための機械的開閉器である。

また、本システムの特徴は、太陽光発電電力出力変動抑制用蓄電装置(Batt1)と夜間電力有効活用蓄電装置(Batt2)とを分離し、2つの蓄電システムを有していることである。

太陽光発電電力出力変動抑制用蓄電装置では、太陽光発電電力の充放電により、出力変動平滑化機能を果たし、電力系統から蓄電することはない。

夜間電力有効活用蓄電装置では、夜間電力を電力系統から蓄電し、昼間時間帯に需要家内負荷にのみ電力を供給する。受電電力逆潮流監視と機械式開閉器を用いた逆潮流防止機能により、夜間電力分の逆潮流を確実に防止する。

2.3.2 システム運用形態

夜間電力を蓄電するシステムでは通常、昼間料金時間帯に夜間電力分を逆潮流することはできない。

本システムでは、太陽光発電電力>需要家消費電力の時は、太陽光発電余剰電力のみを逆潮流する。この時、受電電力監視システムの逆潮流継電器(RPR)動作により、BC2停止とともに、SW1を開放する。従って、Batt2からの放電電力が無く、逆潮流有りの太陽光発電システムとして運用することができる。一方、太陽光発電電力<需要家消費電力の時は、受電電力監視システムにて受電電力を監視しながら需要家の受電電力(買電)最小制御を行う。これらシーケンスにより、太陽光発電利用と夜間電力の有効活用を両立させた。

なお、リチウムポリマ電池の運用に際しては、独自のバッテリー・マネジメント・システムを開発し、電池セル電圧均等化充電制御や各種保護機能による安全性向上を図った。

2.3.3 高効率DC/DCコンバータの開発

近年半導体デバイスの性能向上により、スイッチング速度の向上が図られている。デバイスのスイッチング時にはスイッチング損失が発生し、特に高速スイッチングにおいては、ダイオードの逆回復期間に発生する損失が、依然として大きい⁽⁵⁾。

今回開発したソフトスイッチング方式は、補助回路を一切付加することなく、半導体スイッチのゼロ電圧・ゼロ電流スイッチングにより、スイッチング損失とダイオードのリカバリーによる損失をゼロにする制御を実現した。

図3に今回開発したDC/DCコンバータを示す。リアクトル電流（入力電流） $i_{in} \sim i_{3in}$ を電流がゼロ点をむかえる不連続モードと連続モードの境界付近で動作させる。そのために、リアクトル値Lおよび高速サンプリングにより検出した入出力電圧値 V_{in} 、 V_{out} を用いて、FPGAにより半導体スイッチSWのON時間 T_1 、周期 T_2 を演算し、制御している。

ダイオードDが完全に逆回復したあと、スイッチをターンオンさせることで、スイッチSWのソフトスイッチングを実現し、ターンオン時に発生するスイッチング損失を原理上ゼロとした。

ターンオフ時は、スイッチングデバイスの寄生キャパシタによりゼロ電圧スイッチングが形成され、損失は発生しない。

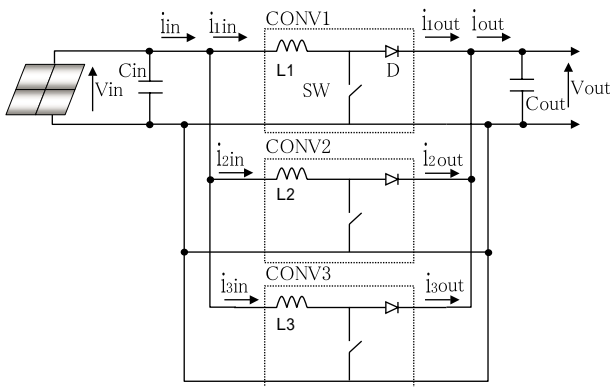


図3 DC/DCコンバータ基本回路（CHOPの例）

図4に示すように、コンバータ変換効率は昇圧動作時97.8%、降圧動作時98.5%が得られた。

図5に、3並列多重にした場合の各コンバータの電流波形を示す。

境界モードでは電流波形がほぼ三角形状になるため、電流ピーク値 I_p を制御することで、各コンバータの平均電流 I_{ave} をバランスさせることができる。これにより、容易にDC/DCコンバータを並列

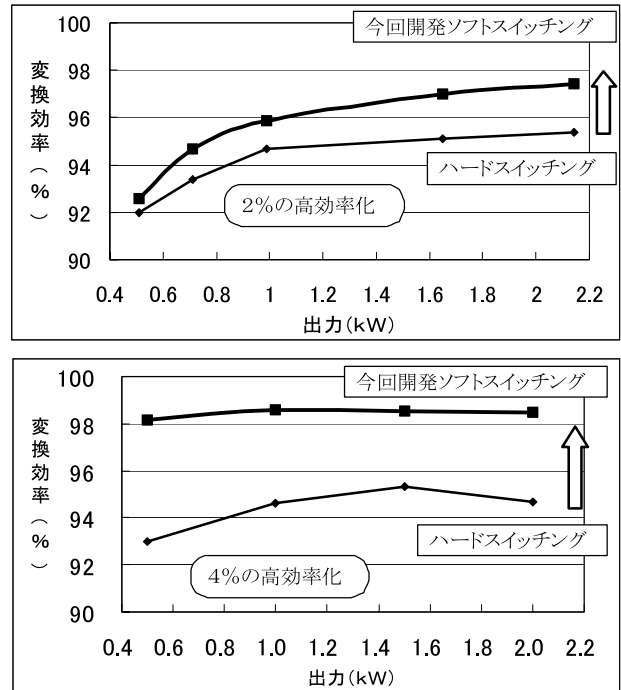


図4 本開発ソフトスイッチングとハードスイッチングでの効率比較（2kW出力時）（上図：昇圧動作時 下図：降圧動作時）

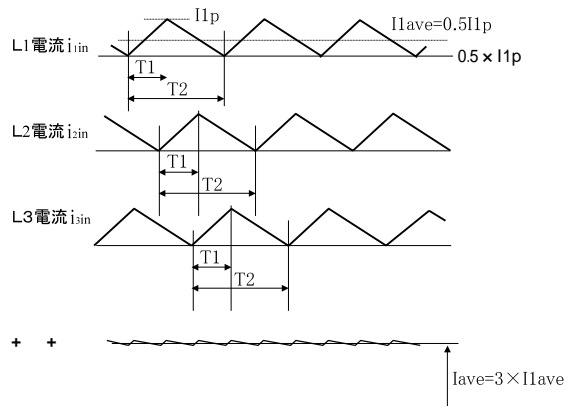


図5 並列多重DC/DCコンバータ入力電流波形

多重接続することができ、大容量化に適した制御方式となる。各々のスイッチングタイミングを1/3周期ずつずらすことで、合成入力電流リップルを低減できる効果もある。

3. バッテリー・マネジメント・システムの開発

蓄電装置には、小型でエネルギー密度の高いリチウムポリマ電池を採用し、夜間電力有効活用蓄電装置用と太陽光発電電力出力変動抑制用の2種類のバッテリー・マネジメント・システム（BMS）を開発した。

夜間電力有効活用蓄電装置BMSでは、電池セルを個別に管理するとともに、過充電・過放電保護、温度上昇時の遮断機能、セル電圧の均等化処理機能を持っている。電池セルの均等化手法には、定電流充電時に所定の電圧に達した電池セ

ルへ流れる電流をスイッチで切替え、バイパス抵抗で消費させる方法と所定電圧に達した電池セルをリレーにより切り離す方法とがある。本開発では、後者の均等化時の電力ロスの少ないリレーを用いた切り離し方式を採用している。

図6にBMSの基本構成を示す。ハイブリッドパワーコンディショナとの通信機能を搭載したマスターユニットと電圧測定、温度測定、均等化処理の機能を持ち、電池セルを個別に管理するスレーブユニットで構成している。スレーブユニットでは12ビットA/Dコンバータとともに汎用マイコンでのローカル制御により、計測精度を向上させ、BMSでの電池セル過充電・過放電に対する安全性向上を図っている。

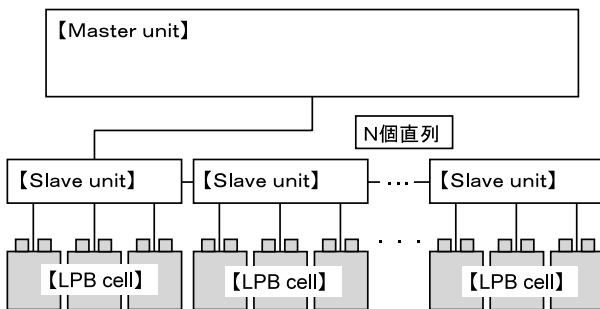


図6 BMSの基本構成

太陽光発電電力出力変動抑制用蓄電装置BMSでは、短時間で充放電を繰り返すため、電池の残存容量により充放電の可否を判定することが必要である。本開発では、電流積算により電池のSOC(State Of Charge)レベルを推定し、制御している。SOCの範囲は過充電・過放電の上下限電圧を考慮し、30~70%での管理・制御を行っている。

4. システム仕様と試験結果

4.1 システム仕様

図7に今回開発したハイブリッドパワーコンディショナの概観を、表2に主な装置仕様を示す。

各コンバータの効率化による冷却部の小型化および実装部品の高密度化により、装置の小型化を図った。また、デジタル制御基板の高集積化を図り、各コンバータおよびインバータの制御機能の一体化を実現した。

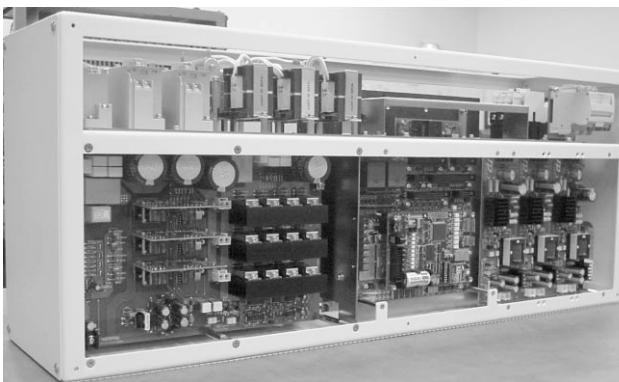


図7 ハイブリッドパワーコンディショナ試作器

表2 ハイブリッドパワーコンディショナ仕様

項目	仕様
インバータ方式	電圧型電流制御
絶縁方式	非絶縁(トランスレス)
電気方式	単相2線
INV入力電圧	DC350V一定制御
INV出力電圧	AC202V±20V
INV定格容量	5kW
CHOP(PV用)入力電圧	DC180~335V
CHOP(PV用)定格容量	3kW
BC1(Batt1)入力電圧	DC120~168V
BC1(Batt1)定格容量	1kW
BC2(Batt2)入力電圧	DC168~235V
BC2(Batt2)定格容量	2kW
総合効率	95%
寸法	(W)770×(D)195×(H)310mm

4.2 試験結果

太陽光発電電力出力変動抑制用、夜間電力有効活用蓄電装置の2種類のリチウムポリマ電池(計10kWh)および太陽電池モジュール(3kW)と組み合わせ、フィールド試験を実施した。

4.2.1 夜間電力有効活用システム動作結果

図8に本システムのフィールド動作検証結果を示す。

太陽光発電電力の小さい朝・夕刻時においては、太陽光発電電力と夜間に蓄電した電力(以下“夜間充電電力”)により、需要家負荷に電力を供給している。この期間では、受電電力監視システム指令値に基づいた買電最小制御(今回の検証では約500W)を行うことにより、系統へ電力が逆潮流されない範囲で夜間充電電力を有効活用している。

10:00頃からは、太陽光発電電力が負荷消費電力より大きくなるが、逆潮流中はRPRが動作し、その

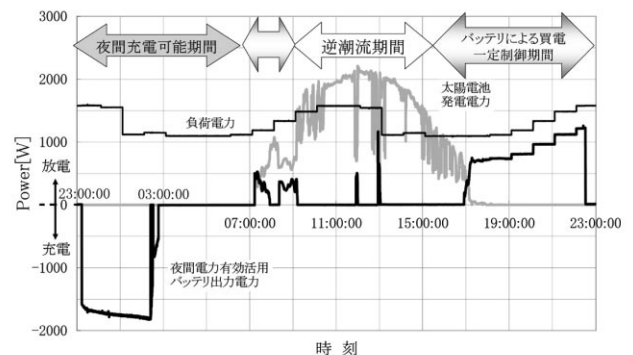


図8 システム動作結果(1日の動作例)

動作信号によりBC2停止とともにSW1「開」動作を行うため、夜間充電電力が逆潮流されることのないシーケンスになっている。

夜間時間帯（23:00～7:00）では、負荷電力は系統から供給される。同時に、夜間電力有効活用蓄電装置への充電を行っている。

4.2.2 太陽光発電電力出力変動抑制動作結果

図9に太陽光発電電力出力変動抑制用蓄電装置の充放電動作による変動抑制効果を示す。

太陽光発電電力の出力変動に対して、出力変動抑制用蓄電装置からの充放電動作（負方向：充電、正方向：放電）により、インバータ入力電力（インバータ出力電力）が平滑化されている様子がわかる。

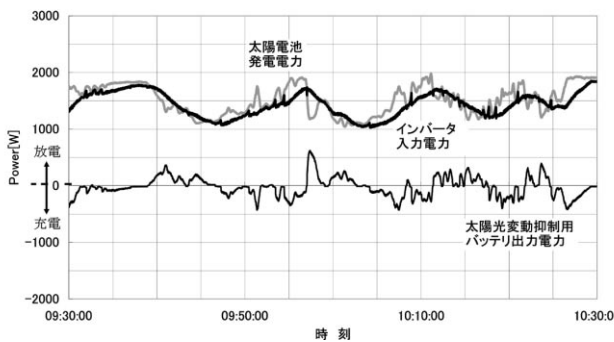


図9 太陽光発電電力変動抑制効果（平滑化時定数3秒の例）

5. あとがき

太陽光・蓄電装置ハイブリッドパワーコンディショナシステムを開発した。本システムの適用により、太陽光発電電力と夜間電力を効率よく利用することができる。

電力会社にとっては、夜間電力の消費量増大による負荷平準化が、需要家にとっては電気料金低減効果が期待できる。

また、蓄電装置を併用しているため、逆潮流期間中での配電系統の電圧上昇抑制対策も容易に行え、集中連系における諸問題の解決策の一つとしても期待できる。

今後、本システム普及には、コストウエイトの大きい蓄電装置や太陽電池の更なる低コスト化とリチウム系バッテリーの信頼性・安全性の向上を図ることが必要となる。

最後に、本技術開発は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の共同研究業務にて実施したものである。関係各位の御支援・御指導に感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構ホームページ：「2030年に向けた太陽光発電ロードマップ」の概要
- (2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構ホームページ：関電工他、「集中連系型太陽光発電システム実証研究」
- (3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構ホームページ
- (4) 滝川 清：電力中央研究所研究報告 T02050
- (5) L.Huber、B.T.Irving、M.M.Jovanovic：“Open-Loop Control Methods for Interleaved DCM/CCM Boundary Boost PFC Converters”、IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS、VOL.23、NO.4、pp1649-1657、JULY 2008

執筆者紹介



養輪義文 Yoshifumi Minowa
技術開発研究所
システム研究センター 主任



長瀬只雄 Tadao Nagase
技術開発研究所
システム研究センター



松川 満 Mitsuru Matsukawa
技術開発研究所
システム研究センター 部長
技術士（電気・電子）



北祐太郎 Yutaro Kita
フジプレアム株式会社
生産技術開発事業本部
ソーラクリエイト事業 担当部長