

# 電気二重層コンデンサを併用した独立型太陽光発電システム

## ～ システム制御法の提案と実験による特性評価 ～

学生員 川口 博嗣 (東京農工大学) 会員 黒川 浩助 (東京農工大学)  
野崎 洋介 (NTT通信エネルギー研究所)

### A Stand-Alone Photovoltaic System using Electric Double Layer Capacitors and Lead Acid Batteries

Hiroshi Kawaguchi\*, Kousuke Kurokawa\*  
and Yousuke Nozaki\*\*

\*Tokyo University of Agriculture & Technology  
Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588 Japan  
E-mail: hiro-k@cc.tuat.ac.jp

\*\*NTT Telecommunications Energy Laboratories

#### ABSTRACT

We previously proposed a stand-alone photovoltaic system using electric double layer capacitors (EDLC) and lead acid batteries. This system can extend the battery-life because it reduces the number of battery charge and discharge cycles, furnishing power at night and on cloudy days by EDLC power. In this paper, we describe the configuration and operating conditions of this system. We also describe the optimal control and the effect of operating the EDLCs and battery. A simulation of 10 days of operation showed that they reduced the battery contribution factor by about 12% and increased the power conversion in this system by about 2%.

#### 1. はじめに

近年、発展途上国のルーラル地域の電化を目的としたソーラーホームシステムや山間部の無線通信装置の電源として独立型太陽光発電 (PV) システムの導入が進められている。独立型 PV システムは一般的に、バックアップ用として鉛蓄電池を用いており、曇天時及び夜間等の不日照時には、鉛蓄電池の放電電力により負荷電力を供給する。従って、鉛蓄電池は必ず 1 日に 1 回は放電が行われ、充放電回数が非常に多くなる。

特に、鉛蓄電池容量を小さく設定した場合には、深い深度で充放電を繰り返すため、劣化を早める原因となっている。また、鉛蓄電池は最適な電圧で充電することが望ましいが、曇天時等では発電量が不足するため、適切な充電電圧が維持できない等の問題がある。そこで、筆者らは、鉛蓄電池の長寿命化を目的に充放電サイクルによる劣化がほとんど無く、また数十 F (ファラッド) の大容量を有し、急速充電特性にも優れた電気二重層コンデンサ (EDLC) [1] を鉛蓄電池と併用し、短期間不日照時の発電量の変動を平滑にすることにより、鉛蓄電池の充放電回数を低減させ、劣化を防止するシステムを提案している [2] [3] [4]。本論文では、鉛蓄電池充電時の EDLC の電圧低下を防止し、システムに用いられているコンバータの効率向上を図るとともに、鉛蓄電池への依存率をさらに抑制できる新しい制御法を提案し実験によりその効果を確認したので報告する。

#### 2. システム構成

システム構成を図 1 に示す。PV 出力に、コンバータ 1、コンバータ 2、及び直流負荷を直列に接続し、EDLC をコンバータ 1 の出力に、鉛蓄電池をコンバータ 2 の出力に接続してシステムを構成する。

晴天時には PV の出力電力により EDLC 及び鉛蓄電池の充電と負荷への電力供給を行う。また短期間の曇天時及び夜間には、EDLC の放電電力により鉛蓄電池及び負荷に電力供給を行う。長期不日照時の場合のみ、鉛蓄電池の放電電力により負荷への電力供給を行う。従って、鉛蓄電池の放電回数を低減することができる。

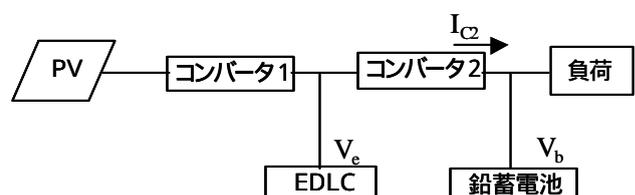


図 1. システム構成

### 3. 制御方法

本システムの特徴はコンバータ 1 及びコンバータ 2 の効率が EDLC の電圧に大きく依存することである。特に、鉛蓄電池の充電中に EDLC の電圧が低い場合には、コンバータ 1 の出力電流とコンバータ 2 の入力電流が非常に大きくなり、効率が著しく低下するという問題がある。そこで、以下のように鉛蓄電池の充電中に EDLC の電圧を高く維持する制御機能をコンバータ 2 に加える方法を提案した。

#### 3.1 コンバータ 1 の制御

コンバータ 1 の制御フローを図 2 に示す。PV 出力電力を最大にするための最大電力追従制御 (MPPT) モードと EDLC の過電圧を防止するための定電圧モードを設定する。EDLC の端子電圧  $V_e$  が定格近傍の設定電圧  $V_{1m}$  を上回った場合には MPPT モードから定電圧モードに切り替わり、 $V_e$  が設定電圧  $V_{2m}$  を下回った場合には、再び MPPT モードへ切り替わる。ここで、モード切り替えのチャタリングを防止するため  $V_{1m} > V_{2m}$  とする。これにより、MPPT 制御による発電効率の向上と EDLC の破損防止が可能になる。

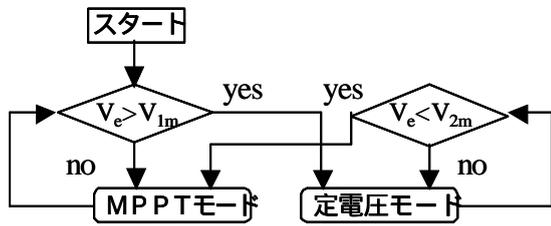
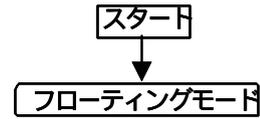


図 2. コンバータ 1 の制御

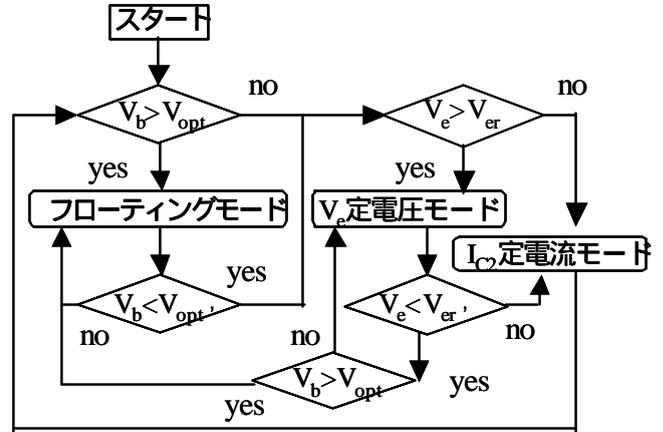
#### 3.2 コンバータ 2 の制御

提案するコンバータ 2 の制御フローを従来の制御と比較して図 3 に示す。従来制御では、常に鉛蓄電池が浮動充電となるフローティングモードで動作する。従って、鉛蓄電池の充電量が不十分な場合には充電電流が大きく、EDLC の電圧はコンバータ 2 の昇圧限界で決まる低い電圧で一定となる。

一方、新制御では、フローティングモードに加えて EDLC の充電を優先的にを行い、負荷相当の電流  $I_{C2}$  のみを出力する  $I_{C2}$  定電流モード及び EDLC の電圧がほぼ定格に上昇した場合には、 $V_e$  を定電圧で一定とする  $V_e$  定電圧モードを設定する。これにより、鉛蓄電池の充電に先立って、EDLC の充電を行うことができるため、鉛蓄電池の充電中の EDLC 電圧を高く維持できるとともに、鉛蓄電池への依存率を抑制することが可能になる。



(A) 従来の制御



(B) 新制御

図 3. コンバータ 2 の制御

### 4. 実験結果

#### 4.1 実験条件

本実験で使用したシステム仕様を表 1 に、システム回路構成を図 4 に示す。DSP を中心とした制御系は、PV の発電電力、EDLC 及び鉛蓄電池の出力端子電圧、コンバータ 2 の出力電流を検出して制御演算を行い、各コンバータの MOS-FET を制御する。

PV 模擬電源は、PV 特有の IV 特性をもった出力特性を実現でき、日射強度を自由に制御できる。

表 1. システム仕様

| 分類    | 仕様  |
|-------|---|
| PV電源  | 定格 :150W、 $V_{oc}$ :15V、 $I_{sc}$ :12A、FF :07 |
| EDLC  | 定格 :12V-3A、2直2並列接続                            |
| 鉛蓄電池  | 定格 :12V-3A、2並列接続                              |
| 負荷    | 抵抗負荷 (約10W)                                   |
| コンバータ | 昇降圧チョップパ、スイッチング周波数20 kHz                      |

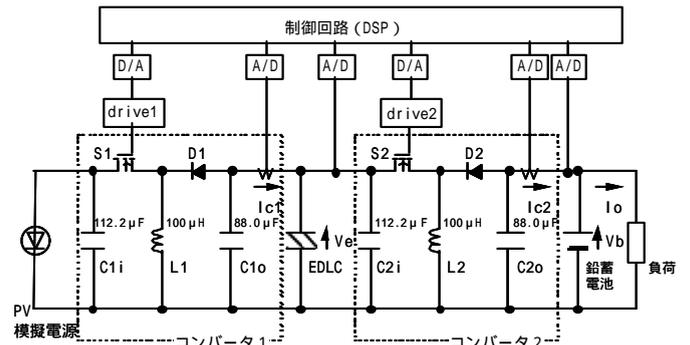


図 4. システム回路構成

## 4.2 鉛蓄電池充電時の動作確認

### 4.2.1 EDLC の電圧と鉛蓄電池の充電電流

動作時の EDLC の電圧を図 5 に、鉛蓄電池の充電電流を図 6 に示す。初期条件として、EDLC の電圧は 3V 程度とし、鉛蓄電池は定格の 60% 程度放電させた状態とする。また日射強度は定格を  $1\text{ kW/m}^2$  として初期は午前中の日射条件を模擬し、充電動作を確認するために定格まで上昇すると一定になるように設定した。

従来の制御では、EDLC の電圧は起動時から約 400s まではコンバータ 2 の昇圧限界で決まり、5V 程度の低い電圧を維持したまま鉛蓄電池の充電が行われる。400s 以降には鉛蓄電池の充電電流が低下し、EDLC の充電が開始され、EDLC の電圧が上昇する。

一方、新制御では、鉛蓄電池の充電電流は 100s から 300s の間には、コンバータ 2 が定電流モードであるため 3A 程度と小さく、EDLC の充電が優先的に行われる。EDLC の電圧が定格電圧近傍まで上昇すると、 $V_e$  定電圧モードを経て、フローティングモードとなるため、EDLC の充電が停止され、鉛蓄電池の充電電流が急激に上昇する。以上から、新制御が所望の動作を行うことが確認できる。

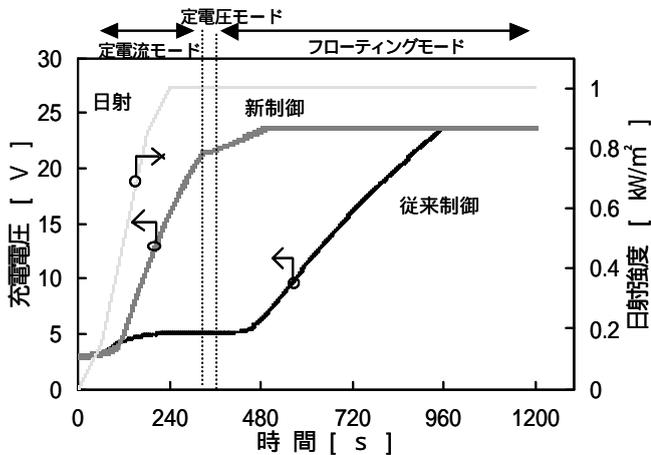


図 5. EDLC の充電電圧

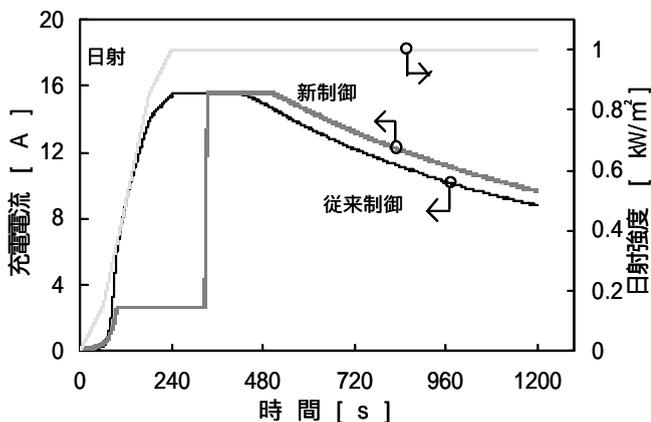


図 6. 鉛蓄電池の充電電流

### 4.2.2 コンバータの効率

図 5 及び図 6 と同じ条件でのコンバータ 1 及びコンバータ 2 の変換効率を比較して図 8 及び図 9 に示す。

従来の制御では、鉛蓄電池が満充電に達する約 480s まで、EDLC の電圧が上昇しないため、コンバータ 1 及びコンバータ 2 は 75% 程度の低い変換効率になる。このことから、EDLC の電圧はコンバータの変換効率に影響を与え、 $V_e$  が低い状態で日射が上昇するとコンバータ効率が低下することが確認できる。

一方、新制御では、EDLC の充電が優先的に行われるため、日射の上昇とともに EDLC の電圧が上昇し、効率の低下はほとんどなく、コンバータ 1 及びコンバータ 2 はともに 80% 以上の変換効率を維持する。従来制御の変換効率を比較すると、最大で 8% 程度効率が高くなる。実際のシステムでは、長期にわたって不日照が継続したあとには、鉛蓄電池の充電が長時間継続されるため、提案する新制御がシステム効率向上に有効であると推測される。

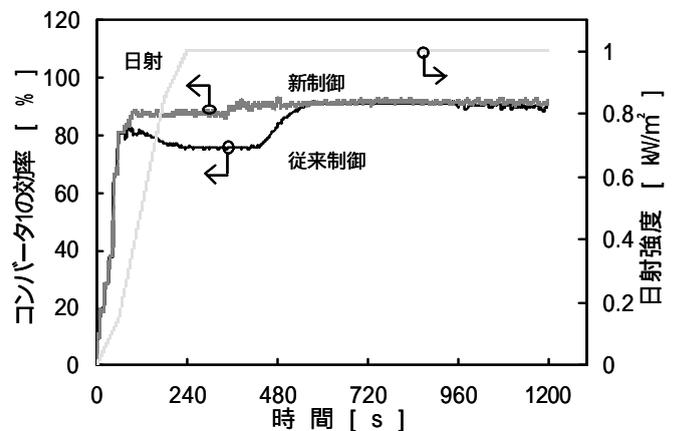


図 7. コンバータ 1 の効率

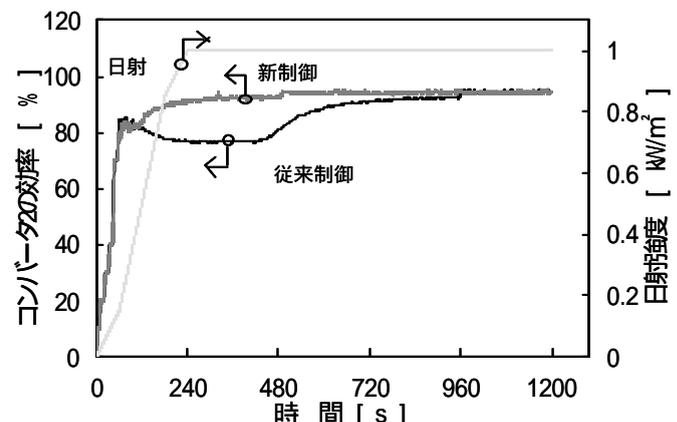


図 8. コンバータ 2 の効率

### 4.3 長期動作を模擬した時間短縮試験

晴天時、曇天時、長期不日照時を模擬した日射パターンを任意に作成し、1分を1時間として、10日間を想定した模擬試験を行った。この条件における各容量の換算値は以下の通りである。

- 晴天日の1日あたりの発電量 : 900Wh
- EDLCによるバックアップ日数 : 1.5日
- 鉛蓄電池によるバックアップ日数 : 7.5日

初期条件として、EDLCの電圧は3V程度とし、鉛蓄電池は定格の30%程度放電した状態とする。

#### 4.3.1 システム動作とEDLC・鉛蓄電池依存率

作成した日射パターン、EDLCの電圧  $V_e$  及び鉛蓄電池の充放電電力を図9に示す。新制御では、EDLCの充放電を優先させるために鉛蓄電池の充放電回数及び充放電量が低減され、表2に示すようにEDLC依存率を約20%増加させ、鉛蓄電池依存率を約12%抑制できる。これは、鉛蓄電池の負担が軽減されたことを示しており、本制御による劣化防止効果も期待される。

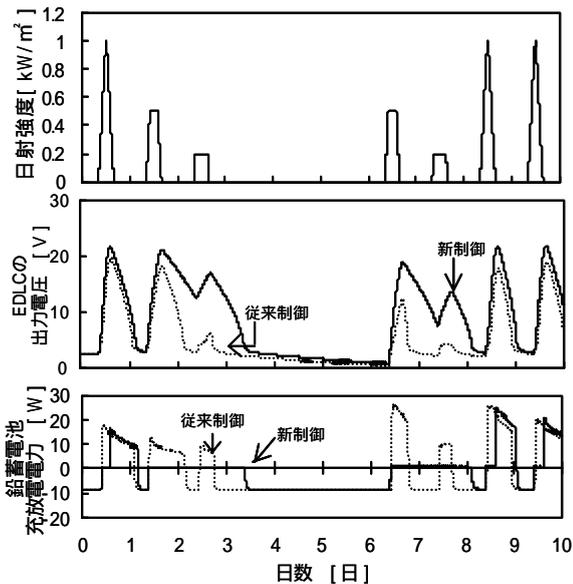


図9. 試験時の動作波形

表2. システム依存率

|          | 従来制御  | 新制御   |
|----------|-------|-------|
| EDLCの依存率 | 31.1% | 51.0% |
| 鉛蓄電池の依存率 | 40.7% | 28.2% |

#### 4.3.2 システム効率と損失分析

上記の試験期間に測定した各コンバータ及びシステムの平均効率を表3に示し、システム損失の分析結果を図10に示す。新制御により、コンバータ1の効率は2%程度向上したが、コンバータ2の効率は逆に1%程度低下した。これは、夜間等のEDLCの放電時

に  $V_e$  が低下し、コンバータ2の入力電流が増加したことが原因と考えられる。しかしながら、鉛蓄電池依存率が抑制されたため、充放電損失が低減され、システム効率は2%程度向上した。このことから、提案した制御法は、システム効率向上にも有効であることが確認できる。

表3. 各コンバータとシステムの平均効率

|           | 従来制御  | 新制御   |
|-----------|-------|-------|
| コンバータ1の効率 | 89.5% | 91.8% |
| コンバータ2の効率 | 89.1% | 88.3% |
| システム効率    | 69.3% | 71.5% |

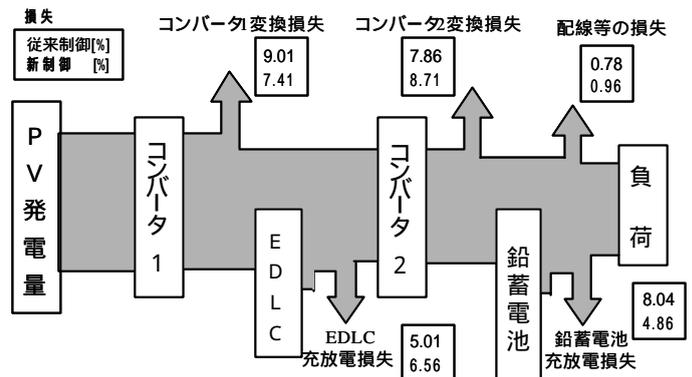


図10. システム損失分析

## 5. まとめ

電気二重層コンデンサ (EDLC) と鉛蓄電池を併用した独立型システムについて EDLC の充放電を優先的に行う制御法を提案し、10日間の日射パターンを擬して実験した結果、従来の制御法と比較して、鉛蓄電池依存率を12%程度抑制できること、2%程度のシステム効率向上が可能であることを明らかにした。

### [参考文献]

- [1] 斎藤、田淵、吉備他：大容量電気二重層コンデンサ、NEC 技報 Vol.46、No10、P89~95、1993
- [2] Y. Nozaki, N. Matsuzaki, T. Yamashita: Power Control in a Stand-alone Photovoltaic Power System Using Electric Double Layer Capacitors and Lead Acid Batteries, 2<sup>nd</sup>WCPEC, July, P2900, 1998
- [3] 野崎、松崎、秋山、山下：円筒型モジュールを用いた独立型太陽光発電システム、信学技報、P47、1999
- [4] 野崎、松崎、秋山、山下：ワイヤレスアクセス用独立型太陽光発電システム、電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集2、P589、1998