

# EDLC を組み込んだ独立型太陽光発電システムのシミュレーション

川口 博嗣\* , 黒川 浩助\* , 野崎 洋介\*\* , 谷内 利明\*\*

\*東京農工大学

〒184-0012 東京都小金井市中町 2-24-16 Tel: 0423-88-7445

\*\*NTT 通信エネルギー研究所

〒180-8585 東京都武蔵野市緑町 3-9-11 Tel: 0422-59-2012

E-mail: hiro-k@cc.tuat.ac.jp

## あらまし :

近年、商用電源の確保が困難な場所でのワイアレスアクセスシステム等の給電方式として、独立型太陽光発電 (PV) システムの導入が検討されている。独立型 PV システムは、一般的に蓄電装置として鉛蓄電池を用いているが、充放電時の損失や満充電時の充電電流の低下によるシステム効率の低下、さらには長期的に日射不足が続いた場合の深い放電による鉛蓄電池の劣化等の問題が指摘されている。筆者らは、充放電の繰り返しによる劣化がほとんどない電気二重層キャパシタ (EDLC) を鉛蓄電池と併用することにより、鉛蓄電池の負荷を低減するシステムを提案している。本論文では、提案するシステムと従来型システムについて、新たに作成したシミュレータを用い、PV ミスマッチ損失率や鉛蓄電池依存率等を求めて年間における動作特性を示し、提案システムが高効率化及び長寿命化に有効であることを明らかにした。

キーワード：独立型太陽光発電システム、電気二重層キャパシタ、鉛蓄電池

## Simulation of a Stand-Alone Photovoltaic System

### Using Electric Double Layer Capacitors and Lead Acid Batteries

Hiroshi Kawaguchi\*, Kosuke Kurokawa\* and Yousuke Nozaki\*\*, Toshiaki Yachi\*\*

\*Tokyo University of Agriculture & Technology

2-24-16, Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-0012, Japan

\*\*NTT Telecommunications Energy Laboratories

3-9-11, Midori-Cho, Musashino-shi, Tokyo, 180-8585, Japan

E-mail: hiro-k@cc.tuat.ac.jp

## ABSTRACT:

We previously proposed a stand-alone photovoltaic (PV) system using electric double layer capacitors (EDLC) and lead acid batteries as power devices. Here, we simulated this system's operation and its characteristics and evaluated the PV array power mismatching loss ratio, battery contribution factor, and minimum state of charge (SOC). The results provide further date showing that the proposed system is effective at reducing the PV mismatching loss ratio and battery contribution factor and increasing the minimum SOC. Consequently, the proposed system should have a longer battery lifetime than a conventional system.

## Key words:

Stand-alone photovoltaic system, EDLC, battery

## 1. はじめに

近年、山間部や離島等の商用電源の確保が困難な場所での携帯電話基地局やワイアレスアクセスシステム等の給電方式として、独立型太陽光発電(PV)システムの導入が検討されている。独立型PVシステムは、一般的に夜間等の不日照時に蓄電装置からバックアップを行うことにより、負荷への電力供給を行う。従来から蓄電装置には鉛蓄電池が用いられているが、充放電時の損失や満充電時の充電電流の低下によるシステム効率の低下、日々の充放電の繰り返しや長期的に日射不足が続いた場合の深い放電による劣化等の問題が指摘されている。これらの問題を解決するために筆者らは、急速充放電特性に優れ、充放電の繰り返しによる劣化がほとんどない電気二重層キャパシタ(EDLC)<sup>[1][2]</sup>を鉛蓄電池と併用することにより、鉛蓄電池の負荷を低減するシステムを提案している<sup>[3]~[7]</sup>。本論文では、提案しているシステムの回路構成、制御方法について説明する。また、新たに作成したシミュレータによるシミュレーション方法を概説するとともに、実験データとの比較により本シミュレーションの妥当性を議論する。さらに、METPVを用いて年間の動作特性を明らかにする。具体的には、提案するシステムと従来型システムのPV mismatch損失率、負荷供給量に対する鉛蓄電池依存率、年間を通じて最低の充電状態(SOC)についての比較を行う。

## 2. システム構成

提案するシステムの構成を図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。

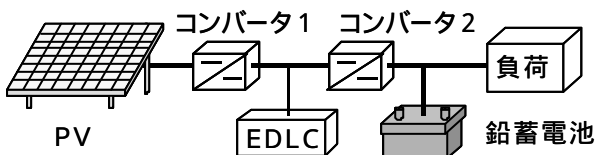


図1. 提案するシステムの構成

Fig. 1. Configuration of the proposed system using EDLCs and batteries.

## 3. システム動作

提案するシステムの動作を図2に示す。晴天時にはPV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。また短期不日照時及び夜間には、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。

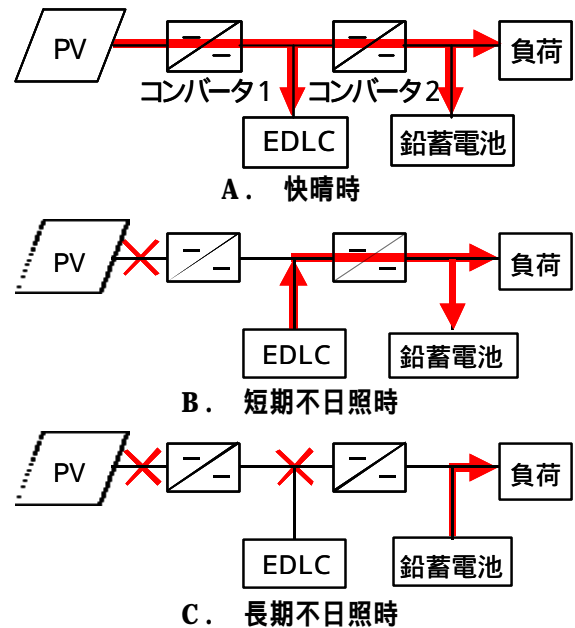


図2. 提案するシステムの動作

Fig. 2. Operation of the proposed system using EDLCs and batteries system.

## 4. システム制御

### 4.1 コンバータ1の制御

コンバータ1の制御フローを図3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。

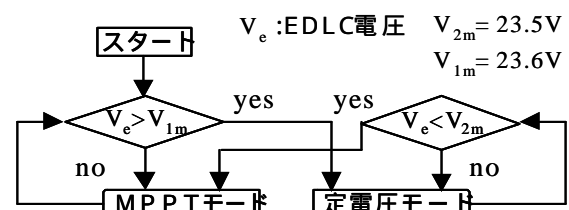


図3. コンバータ1の制御

Fig. 3. Control of converter 1.

## 4.2 コンバータ2の制御

コンバータ2の制御フローを図3に示す。EDLCの充電を優先的に行い、負荷相当の電流  $I_{C2}$  のみを出力する  $I_{C2}$  定電流モード、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  $V_e$  定電圧モード及び鉛蓄電池を浮動充電にするフローティングモードを設定する。

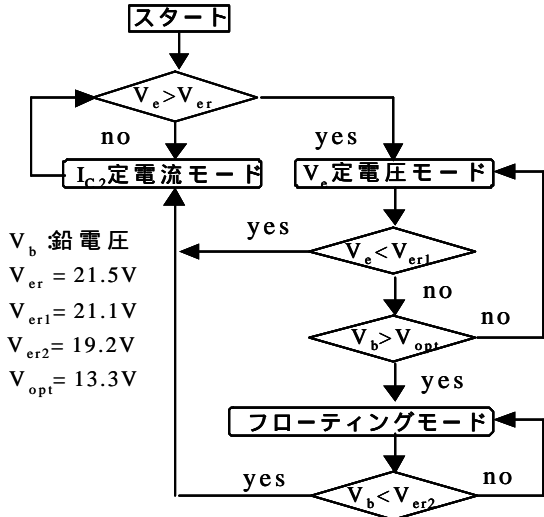


図4. コンバータ2の制御

Fig. 4 Control of converter 2.

## 5. シミュレーション方法

提案するシステムの年間における動作特性を PV ミスマッチ損失率や鉛蓄電池依存率等により評価するため、システムの構成要素の変数を考慮したシミュレータを新たに作成した。時刻  $t$  におけるシミュレーションフローを図5に示す。DC-DC コンバータの動作特性は実験データによりモデル化を行い、EDLC 及び鉛蓄電池は、充放電電流等の特性式を組み合わせたモデルを使用した。実験データとの比較に関しては PV 模擬電源で日射を模擬したデータに基づいて、年間特性に関しては、METPV で日射を推定したデータに基づいて、システム構成要素の状態を逐次計算することにより、シミュレーションを行った。

### 5.1 DC-DC コンバータの特性

#### 5.1.1 コンバータ1 効率の近似特性

コンバータ1における損失は、PVの定格電圧で正規化されたEDLC電圧とPVの定格電流で正規化された出力電流により次式で表される。また、各定数は実験より求められる。

$$P_{loss1} = P_1 + K_{o1}V_e + K_{C1}V_e^2 + K_{E1}I_{PV} + K_{R1}I_{PV}^2 \quad (1)$$

$P_{loss1}$ : コンバータ1の損失,  $P_1$ : 固定損,  $K_{I1}V_e$ : 鉄損等の損失,  $K_{C1}V_e^2$ : 充放電等の損失,  $K_{E1}I_{PV}$ : 電圧降下等の損失,  $K_{R1}I_{PV}^2$ : 回路抵抗の損失

$$P_1 = 8.62 \times 10^{-5}, K_{I1} = 6.82 \times 10^{-4}, K_{C1} = 3.12 \times 10^{-3}, K_{E1} = 2.41 \times 10^{-2}, K_{R1} = 1.81 \times 10^{-1}$$

また、コンバータ1の効率は次式で表される。

$$\zeta_1 = \frac{I_{PV}V_e}{I_{PV}V_e + P_{loss1}} \quad (2)$$

ここで、入力電流は正規化された発電電力により、

$$I_{PV} = \frac{\zeta_1 W_{PV}}{V_e} \quad (3)$$

と表せるため、コンバータ1の効率は、PV発電電力とEDLC電圧により表される。

$$\zeta_1 = \frac{V_e}{2K_{R1}W_{PV}} \left\{ -(K_{E1} + V_e) + \sqrt{(K_{E1} + V_e)^2 - 4K_{R1}(P_1 + K_{I1}V_e + K_{C1}V_e^2 - W_{PV})} \right\} \quad (4)$$

#### 5.1.2 コンバータ2 効率の近似特性

コンバータ2における損失は、式(1)と同様にEDLC電圧と正規化された入力電流により次式で表される。

$$P_{loss2} = P_2 + K_{o2}V_e + K_{C2}V_e^2 + K_{E2}I_{i2} + K_{R2}I_{i2}^2 \quad (5)$$

$P_{loss2}$ : コンバータ2の損失,  $P_2$ : 固定損,  $K_{I2}V_e$ : 鉄損等の損失,  $K_{C2}V_e^2$ : 充放電等の損失,  $K_{E2}I_{i2}$ : 電圧降下等の損失,  $K_{R2}I_{i2}^2$ : 回路抵抗の損失

$$P_2 = 7.82 \times 10^{-5}, K_{I2} = 1.08 \times 10^{-3}, K_{C2} = 1.62 \times 10^{-3}, K_{E2} = 3.81 \times 10^{-2}, K_{R2} = 1.13 \times 10^{-1}$$

また、コンバータ2の効率は次式で表される。

$$\zeta_2 = \frac{I_{i2}V_e}{I_{i2}V_e + P_{loss2}} \quad (6)$$

ここで、入力電流は正規化された出力電流と鉛蓄電池電圧により、

$$I_{i2} = \frac{I_0 V_b}{\zeta_2 V_e} \quad (7)$$

と表せるため、コンバータ2の効率は、出力電流と鉛蓄電池電圧、EDLC電圧により表される。

$$\zeta_2 = \frac{I_{C2}V_b}{2(P_2 + K_{I2}V_e + K_{C2}V_e^2)} \left\{ -\left(\frac{K_{E2}}{V_e} + 1\right) + \sqrt{\left(\frac{K_{E2}}{V_e} + 1\right)^2 - 4(P_2 + K_{I2}V_e + K_{C2}V_e^2) \left(\frac{K_{R2}}{V_e} + \frac{1}{I_{C2}V_b}\right)} \right\} \quad (8)$$

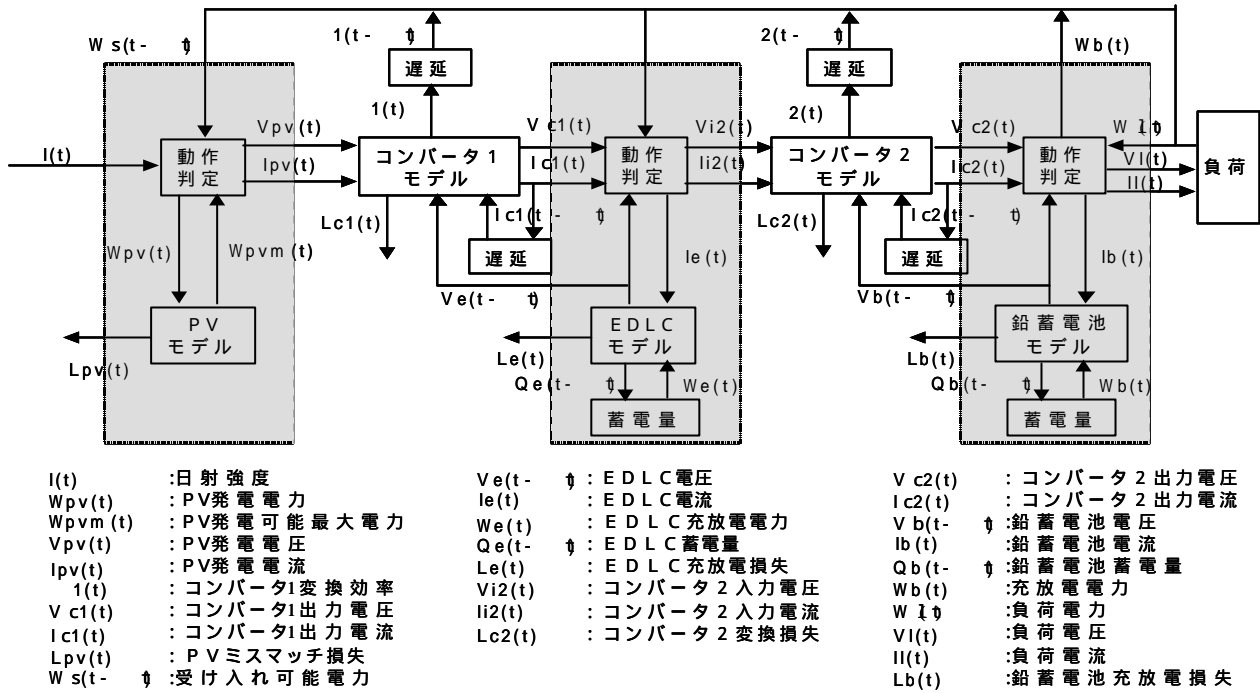


図 5. 時刻  $t$  におけるシステムシミュレーションフロー

Fig. 5. System simulation flow.

## 5.2 鉛蓄電池の特性

鉛蓄電池の特性モデルは、内部起電力と内部抵抗のみによって構成されている。しかしながら、鉛蓄電池の充電時の特性と放電時の特性は異なる。特に充電状態が高いときには、充電電流による水の電気分解によって電圧が異常に上昇する。シミュレーションでは、これらの特性を近似したモデルを使用した<sup>[8]</sup>。式(9)から式(13)までが放電特性を表し、式(14)から式(19)までが充電特性を表す。

$$V_b = E_b - R_b I_b \quad (9)$$

$$E_b = E_0 + k_0 \ln(1 - Q_b / C_T) \quad (10)$$

$$Q_b = \int I_b dt \quad (11)$$

$$R_b = R_0 [1 + B \ln(\tilde{a} / (\tilde{a} - Q_b / C_b))] \quad (12)$$

$$C_b = \frac{C_T}{\{1 + (C_T / C_R - 1)(I_b / I_R)^d\}} \quad (13)$$

$E_b$ : 内部起電力,  $R_b$ : 放電時の内部抵抗,  $I_b$ : 放電電流,  $E_0$ : 完全充電状態の起電力,  $Q_b$ : 放電電力量,  $C_T$ : 最大放電容量,  $C_b$ : 放電容量,  $C_R$ : 定格放電容量,  $I_R$ : 定格放電電流,  $k_0$ ,  $B$ ,  $d$ : 比例定数

$$V_b = E_{bc} + R_{bc} I_{bc} \quad (14)$$

$$E_{bc} = E_1 + k_0 \ln(1 - Q_{bc} / C_T) \quad (15)$$

$$Q_{bc} = \tilde{n} C_{bc} \quad (16)$$

$$R_{bc} = R_0 + R_2 (R_1 - Q_{bc} / C_{bc})^2 + R_X G(t) \quad (17)$$

$$G(t) = \exp\{\tilde{a}(T_G - t)\} U_{(T_G - t)} + [2 - \exp\{\tilde{a}(t - T_G)\}] U_{(t - T_G)} \quad (18)$$

$$\tilde{n} = 1 - \int_0^t G_{(t)} dt / \int_0^\infty G_{(t)} dt \quad (19)$$

$E_{bc}$ : 内部起電力,  $R_{bc}$ : 充電時の内部抵抗,  $I_{bc}$  ( $= -I_b$ ): 充電電流,  $E_1$ : 充電時の起電力,  $T_G$ : ガス発生時間,  $\tilde{n}$ : 充電状態,  $G(t)$ : ガス発生関数,  $U(t)$ ,  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_X$ : 比例定数  
これらの係数のうち,  $R_X$ ,  $T_G$  は電流依存性があり, 次式で与えられる。

$$\tilde{a} = \tilde{a}_0 I_c^{\tilde{a}_1} \quad (21)$$

$$R_X = R_{X0} I_c^{R_{X1}} \quad (22)$$

$$T_G = T_{G0} I_c^{T_{G1}} \quad (23)$$

### 5.3 EDLC の特性

EDLC は物理的な吸着反応であるため、性能劣化が極めて少なく、急速充放電特性に優れている。しかしながら、二次電池に比べ、エネルギー密度が小さいため、本論文では鉛蓄電池と併用したシステムを構成している。EDLC の特性モデルは、キャパシタ電力と内部抵抗のみによって構成される<sup>9)</sup>。ただし、充放電による内部抵抗の増減はなく、充電および放電時の特性式は同様のものを用いた。

$$V_e = E_e + R_e I_e \quad (24)$$

$$E_e = Q_e / C_e \quad (25)$$

$$Q_e = \int I_e dt \quad (26)$$

$E_e$  : キャパシタ電力,  $Q_e$  : 電荷量

### 5.4 PV の特性

PV の出力電力特性は、実験値との比較に関しては PV 模擬電源からのデータを直接使用し、年間のシミュレーションに関しては METPV の傾斜面日射量から容量に合わせて推定した。

### 5.5 負荷の特性

小型通信用電源を想定しているため、消費電力は一定と仮定した。

## 6. 実験値との比較

### 6.1 回路構成

本実験で使用したシステムの回路構成を図6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 特有の日射強度を自由に制御できる。

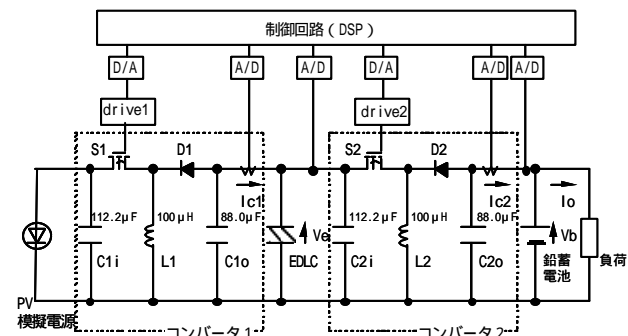


図6. システムの回路構成

Fig. 6. Circuit configuration of the proposed system.

### 6.2 実験値との比較

シミュレーションの精度を確認するため、PV 模擬電源を用いて、1日の晴天時の日射パターンを任意に作成し、得られた実験結果とシミュレーション結果の比較を行った。実験のシステム仕様を表1に示し、作成した日射パターンより期待できる発電電力、18秒間隔で測定した鉛蓄電池とEDLCの電圧及び表1の値を基にしてシミュレーションより得られた鉛蓄電池とEDLCの電圧を図7に示す。初期条件として、EDLCの電圧を放電状態の3Vとし、鉛蓄電池はSOCを95%とした。EDLCの電圧が上昇し、満充電に達すると鉛蓄電池の充電を始め、夜間にはEDLCにより鉛蓄電池の充電及び負荷供給を行っている動作をシミュレーションが追従しており、EDLC及び鉛蓄電池の電圧の実験値と計算値の誤差は5%程度になる。しかしながら、鉛蓄電池の充放電の切り替えが生じるところで誤差が大きくなっている。これは、実際には鉛蓄電池の内部抵抗が緩やかに変化するのに対し、シミュレーションでは切り替えが瞬時に変化するためであると考えられる。この充放電時の変化を除くと、EDLC及び鉛蓄電池の電圧特性はほぼ一致しており、開発したシミュレータにより実動作の予測が可能であると判断できる。

表1. 実験システムの仕様

Table1. System specifications

分類	仕様
PV電源	最大出力 60W, Voc 20V, Isc 4A, FF: 0.75
EDLC	定格 :24V-800F (63Wh), 2直8並列接続
鉛蓄電池	定格 :12V-30Ah (360Wh), 10並列接続
負荷	抵抗負荷 (約5W)
コンバータ	昇降圧チョッパ、スイッチング周波数20kHz

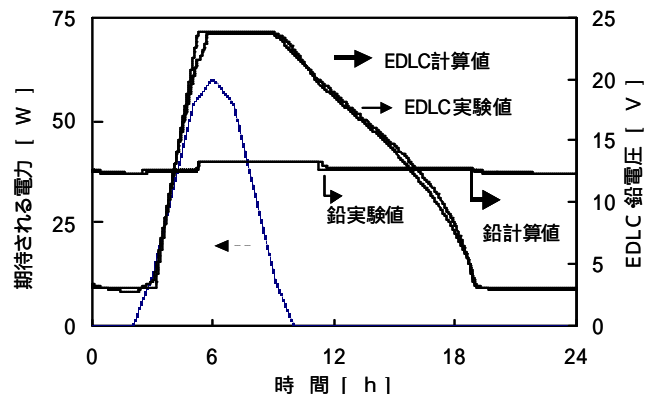


図7. EDLC・鉛蓄電池電圧特性

Fig. 7. Voltage characteristics of EDLCs and batteries.

## 7. シミュレーション結果

### 7.1 比較対象の従来型システム

提案するシステムの比較対象とした従来型システムを図8に示す。PV出力にコンバータ1及び負荷を接続し、鉛蓄電池をコンバータ1の出力に接続する。コンバータ1は図2と同様な制御を行う。

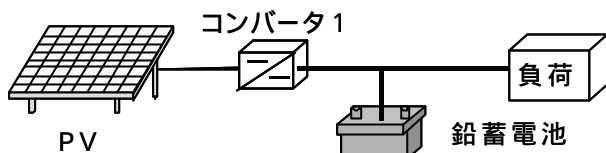


図8. 従来型システム

Fig. 8. Conventional system.

### 7.2 気象データ

気象データとしてMETPVを使用した。METPVは1時間単位であるため、その1時間の間を一定とした階段状の日射がくるものとし、1分間のデータに変換して計算を行った。シミュレーションで用いたMETPVは、東京の平均年データであり、PVの方位角は30度、南向きに設定し、傾斜面日射量によりPV定格出力電力を推定した。

### 7.3 シミュレーションの条件

#### 7.3.1 初期条件

日射は、1月1日午前0時から12月31日24時までの年間データを用い、蓄電装置の初期容量は満充電の状態としてシミュレーションを行った。

#### 7.3.2 容量の設定

従来型システムにおいて、蓄電装置のバックアップ日数を変化させたときの年間におけるシステム停止時間を図9に示す。ここで、システム停止時間は、鉛蓄電池の容量が30%、かつEDLCの電圧が3Vになれば、負荷供給を停止する時間とした。PV容量は50Wから150Wの間で変化させた。PV容量を小型に設定した場合には、システムの停止時間は長期になるが、PV容量を大きくして、蓄電容量を小さく設計した場合には、蓄電装置が蓄えることができる電力量に限りがあるため、過剰なPV発電電力は損失となる。従って、PV容量及び蓄電装置の容量を最適に設定するためにはこれらを考慮する必要がある。シミュレーションでは、通信用電源を想定しているため、負荷供給の信頼度は高く設定しなければならない。そのため年間特性では、図9より停止時間が0となる最小容量の8日間としPVの定格出力電力は120Wに設定した。

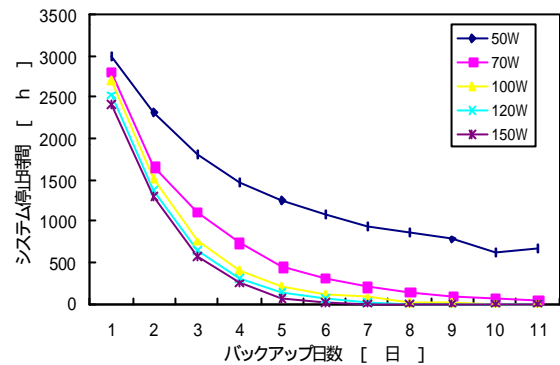


図9. 従来型システムのシステム停止時間

Fig. 9. System downtime of conventional system.

### 7.4 提案するシステムの動作特性評価

提案するシステムの効果を確認するためにPVミスマッチ損失率、総負荷供給電力に対する鉛蓄電池依存率及びの鉛蓄電池の年間を通じて最低のSOCについて、蓄電装置の総容量に対する鉛蓄電池の割合を変化させて評価を行った。また、鉛蓄電池の割合が100%のものは従来型システムを表し、提案システムとの比較を行った。

#### 7.4.1 PV ミスマッチ損失率

鉛蓄電池の割合を変化させたときのPVミスマッチ損失率を図10に示す。いずれの条件に対しても提案システムのミスマッチ損失率は従来型システムより低下している。これは、鉛蓄電池の割合が大きい場合には、充電の際に鉛蓄電池を保護するため、急速に充電できないことによるが、鉛蓄電池の割合が小さい場合には、急速充放電特性に優れたEDLCによりPV発電電力を十分に蓄えることができるため、ミスマッチ損失が低下すると考えられる。このことから、提案システムはミスマッチ損失の削減に有効であり、EDLCの容量を最適に設定することにより、その効果を最大限に得られる。

#### 7.4.2 鉛蓄電池依存率

鉛蓄電池の割合を変化させたときの鉛蓄電池依存率を図11に示す。いずれの条件に対しても提案システムの鉛蓄電池依存率は従来型システムより急激に低下している。これは、鉛蓄電池の割合が小さい場合、EDLCに蓄えることができる電力量が大きくなり、不日照時や夜間に鉛蓄電池を放電することなく負荷への電力供給が可能になるためである。このことから、提案システムにより鉛蓄電池依存率を低減でき、システム効率を向上させることが期待できる。

### 7.4.3 年間を通じて最低のSOC

鉛蓄電池の割合を変化させたときの鉛蓄電池の年間を通じて最低のSOCを図12に示す。今回はSOCが30%になれば、停電するように設定しているため、バックアップ日数が6日のときには、SOCは30%となる。停電しない条件で鉛蓄電池の割合が小さければ、EDLCの充放電のみで負荷供給が可能であるため、鉛蓄電池は常に高いSOCに維持される。しかしながら、鉛蓄電池の割合が大きくなるにつれて、最低のSOCは低下する。特にバックアップ日数が8日のときには、従来型システムよりも低い場合がある。これは、EDLCの容量が小さいと、鉛蓄電池にかかる負荷が大きくなり、また従来型システムよりも鉛蓄電池の容量が小さいことによると考えられる。このことから、提案システムでは、バックアップ日数がある程度大きくすれば、鉛蓄電池にかかる負荷を抑制できるため、劣化防止に有効である。

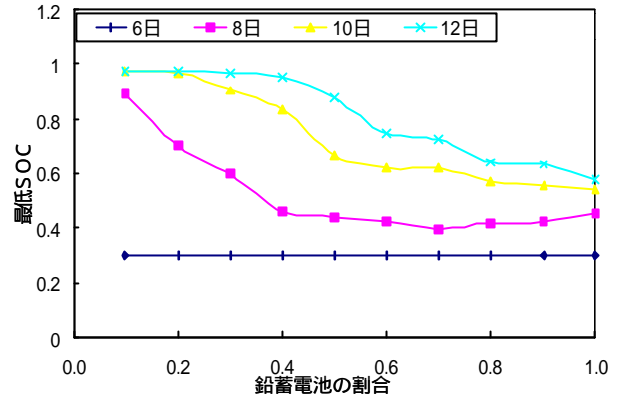


図12. 年間を通じて最低のSOC

Fig. 12. Minimum state of charge.

### 7.4.4 年間特性

前述した容量設定や動作特性評価を基にして、PVの定格出力電力を120W、負荷（小型通信機器）を10W一定、蓄電装置のバックアップ期間を8日間とし、提案システムでは、蓄電装置の総容量に対するEDLCの割合を20%として、提案システムと従来型システムの1ヶ月単位の年間にわたる特性を求めた。従来型システムの発電電力量及び鉛蓄電池依存率の年間特性を図13に示し、提案システムの年間特性を図14に示す。グラフの高さは1ヶ月間にPV出力から期待される発電電力量を示し、これは蓄電装置の充電電力量と負荷供給電力量、PV mismatch損失量、及びコンバータによる電力変換損失量に分別することができる。従来型システムでは、鉛蓄電池が満充電状態に近づくと、充電電流が低下し、PV mismatch損失量が多く発生している。鉛蓄電池依存率については、夜間や不日照時に必ず放電されるため、夏場でも50%以上の割合で鉛蓄電池に依存している。また、季節に関する依存性があり、冬季の最低の発電量にあわせて、鉛蓄電池を設計しなければならない。

これに対して、提案システムでは、電力変換損失量や蓄電装置の充放電損失量は増加するものの、PV mismatch損失量は大きく低下し、またEDLCに蓄えられた電力により夜間や不日照時に負荷への電力供給を行うことができるため、鉛蓄電池依存率を大きく低減できる。また、季節に関する依存性はなく、不日照時がどの程度続くかによって鉛蓄電池依存率は大きく変化する。

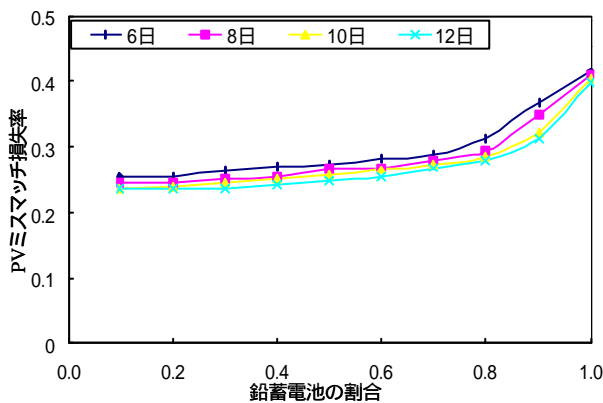


図10. PV mismatch損失率

Fig. 10. PV mismatching loss ratio.

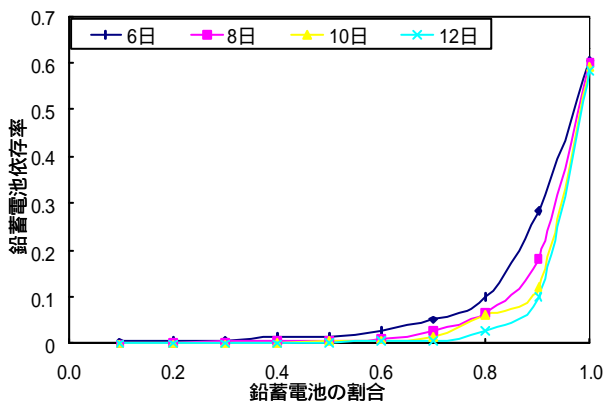


図11. 鉛蓄電池依存率

Fig. 11. Battery contribution factor.

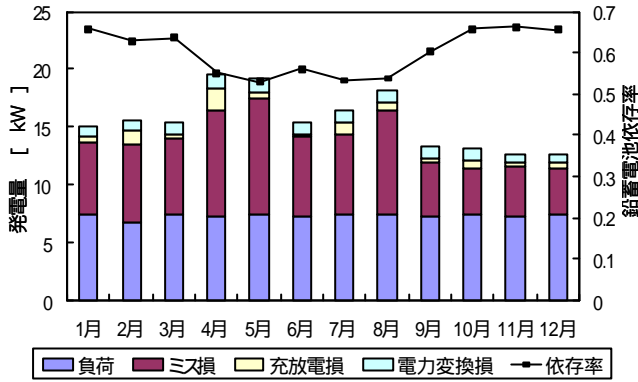


図 13. 従来システムの年間特性

Fig.13. Annual characteristics of the conventional system

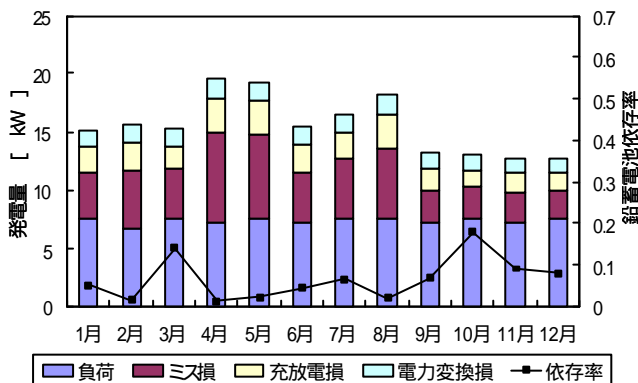


図 14. 提案するシステムの年間特性

Fig.14. Annual characteristics of the proposed system

## 8. まとめ

電気二重層キャパシタ (EDLC) を鉛蓄電池と併用した独立型太陽光発電 (PV) システムを提案し, PV ミスマッチ損失率, 総負荷供給電力に対する鉛蓄電池依存率及び年間を通じて最低の SOC を新たに作成したシミュレータを用いて求めた。その結果, 提案システムは PV ミスマッチ損失率や鉛蓄電池依存率の削減に有効であり, EDLC の容量を最適に設計することにより, その効果を最大限に得られる。さらに, SOC を高く維持できるため, 少ない容量の鉛蓄電池でもバックアップ期間を維持することが可能になり, 鉛蓄電池の設計容量の低減効果や劣化防止に効果的である。このことから, 本システムは独立型 PV システムとして, 高効率化及び長寿命化に非常に有効である。

- [ 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 ] 西野, 直井: 大容量キャパシタ技術と材料, シーエムシー, 1998
- [ 3 ] 川口, 野崎, 黒川: 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, 平成 11 年太陽/風力エネルギー講演論文集, P495, 1999
- [ 4 ] 川口, 野崎, 黒川: 独立型太陽光発電システムの出力係数に関する検討, 平成 12 年電気学会全国大会講演論文集 [ 7 ], P3406, 2000
- [ 5 ] 川口, 野崎, 黒川: 電気二重層キャパシタを組み込んだ独立型太陽光発電システム, 平成 12 年電気学会電力エネルギー部門大会論文集[分冊 A], P665, 2000
- [ 6 ] Y. Nozaki, K.Akiyama, H. Kawaguchi, K.Kurokawa: An Improved for Controlling an EDLC-battery Hybrid Stand-alone Photovoltaic Power System, IEEE APEC2000, P781-786, 2000
- [ 7 ] Y. Nozaki, K.Akiyama, H. Kawaguchi, K.Kurokawa: Evaluation of an EDLC-battery Hybrid Stand-alone Photovoltaic Power System, 28s PVSC IEEE, 2000
- [ 8 ] 黒川: 太陽光発電システム設計ガイドブック, P.57, オーム社, 1994
- [ 9 ] 岡村: 電気二重層キャパシタと蓄電システム, 日刊工業新聞社, P 15, 1999