

太陽光発電を用いた無停電給電システム における受電点電力制御の検討

Study on Tie line power flow control of Uninterruptible Power Supply system
with photovoltaic

武田 隆 ¹ Takashi TAKEDA	後川 知仁 ² Tomohito USHIROKAWA	村井 秀幸 ² Hideyuki MURAI	三好 宏明 ¹ Hiroaki MIYOSHI
雪田 和人 ¹ Kazuto YUKITA	後藤 泰之 ¹ Yasuyuki GOTO	一柳 勝宏 ¹ Katsushiro ICHIYANAGI	太田 拓弥 ³ Takuya OHTA

ABSTRACT

Vigorous research has been conducted on uninterruptible power supply (UPS) systems utilizing renewable energy such as photovoltaic(PV)s, and storage batteries since the Great East Japan Earthquake. In terms of energy security, these systems have increasingly been introduced into facilities of the municipality. However, there are not enough studies quantitatively carried out on operational methods taking account of economies and the life cycle of the storage batteries. In this paper, we describe the effects examined on the economies and the battery life cycle when Tie Line Power Flow Control is utilized on the UPSs having PVs and batteries.

キーワード：太陽光発電，再生可能エネルギー，無停電電源システム

Key words: Photovoltaic, Renewable energy, Uninterruptible Power Supply

1. はじめに

近年，地球温暖化や異常気象など地球環境問題が世界中で深刻さを増している。それに伴い環境負荷軽減を目的として，化石燃料の代替となるエネルギーの導入が積極的に進められており，再生可能エネルギーを利用した分散型電源に関する研究が活発化している。特に日本では，2011年3月11日の東日本大震災以降発生した原子力発電所の稼働停止，電力需要逼迫による計画停電の実施により，その後のエネルギー政策の抜本的見直しを迫られており，この事態の改善手段の一つとして太陽光発電等の再生可能エネルギーの導入拡大，およびそれらを活用した新たな給電システムに一層の期待が寄せられている。しかしながら再生可能エネルギーの多くは，自然現象の中でエネルギーが生成されることから，一般的に単体では安定した発電が

困難であるという課題を有する。この課題を解決するため，再生可能エネルギーとエネルギー蓄積要素である蓄電池とを組み合わせた，給電システムの研究⁽¹⁾⁽²⁾が行われている。

筆者らは，前述した給電システム(マイクログリッド)について，直流電力供給による情報処理装置(サーバー)の動作検証や，交流電力と直流電力を併給可能な実証設備を構築し，実需要環境下での実験，分析，および評価を行ってきた^{(3)~(6)}。これまで，当該マイクログリッドは実需要への電力供給継続に関して良好な運用実績を残している。その一方で，再生可能エネルギーの発電電力量の不足を補う連系動作において，受電開始が気象状況と需要状況に依存して不確定であるという課題があった。これを，商用系統側から観ると需要パターンが予測しにくい需要家であり，需要家側のシステム導入便益の観点では受電電力のピーク値が大きく，基本料金の増大が懸念されるといった課題があった。また，需要家に設置した蓄電池のライフサイクルの観点では，蓄電池充放電が高い電流率で頻りに繰り返され，蓄電池の劣化が早期化するという課題があった。本論文では，電気料金削減および蓄電池早期劣化防止の両面から，提案システムの連系点電力(受電電力)の制御方法について，実際の運用に基づいた現状把握，および複数稼働パターンのシミュレーションの実施結果を報告する。

*1 愛知工業大学 工学部 電気学科 電気工学専攻
(〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)

*2 株式会社 NTT ファシリティアーズ
(〒135-0007 東京都江東区新大橋 1-1-8 エフイーノベーションセンター)

*3 山洋電気株式会社 テクノロジーセンター
(〒386-1211 長野県上田市下之郷 812-3)
(原稿受付:2014年6月30日)

2. 構築した給電システムの構成

本検討において構築したマイクログリッドシステムの外観を図1に示す。このシステムは、愛知工業大学の八草キャンパスに2005年に構築された後、実用に供している。再生可能エネルギーとして太陽光発電が採用され、需給調整用の蓄電池を有するとともに、キャンパス内の教室や図書館の照明、空調、コンセント負荷に電力供給を行っている。本システムの構成を図2に示す。本システムは、既存技術であるパラレルプロセッシング方式無停電電源装置(Parallel Processing (Line-Interactive) Uninterruptible Power Supply:P.P.UPS)⁷⁾の構成に着目し、その主要な構成要素である交流スイッチ(ACSW)を商用系統(Utility grid)との連系点に挿入、双方向変換装置(Bi-directional Converter)を交流スイッチと交流負荷(AC-Load)との間に並列接続したことを特徴とする。交流母線(AC-bus)には、太陽光発電が接続され、双方向変換装置を介した直流母線(DC-bus)には、制御弁式鉛蓄電池(VRLA batteries)が接続される。

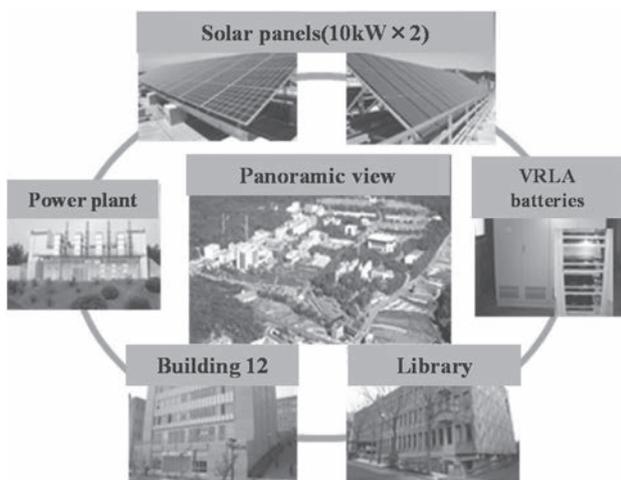


Fig. 1. System appearance
図1 システム外観図

この構成により、太陽光発電をエネルギー源とした電力供給、双方向変換装置と蓄電池による需給バランス調整、さらに交流スイッチにより交流負荷への給電を継続した状態での商用系統との連系および解列を実現する。

システムを構成する各機器の仕様を表1に示す。分散型電源として、太陽光発電設備 10kW を2組導入した。また、双方向変換装置は装置容量 50kW、蓄電池は容量 62kWh を各2組導入した。交流負荷は照明、空調、コンセント負荷であり、また常時稼働している負荷としてネットワーク設備、空調がある。交流負荷の容量は 10kW であり、夜間のベース負荷容量は 2kW である。

3. システムの動作

本検討で用いるシステムは、3種類の運転モードを有する。1つめは商用系統からシステムを切り離し、分散型電源、蓄電池から負荷に電力を供給する自立モードである。2つめは、商用系統と連系して、商用系統と分散型電源、蓄電池から負荷に電力を供給する連系モードである。3つめは、商用系統で停電などの異常が発生した時、交流スイッチをオフにして商用系統を切り離し、分散型電源と蓄電池から負荷に電力を供給するバックアップモードである。

Table1. Lists of Equipment and load
表1 各機器の仕様

Equipment name	Capacity	Number of devices	Remarks
Solar power generation device	10kW	2	
Bi-directional converter device	50kW	2	
Storage battery	62kWh	2	VRLA batteries
AC Load	10kW	1 set	

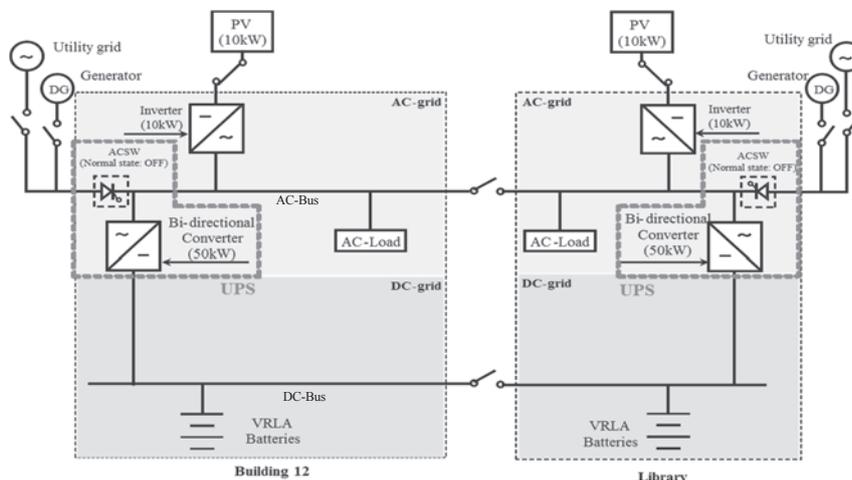


Fig.2. System block diagram
図2 システム構成図

3.1 自立モード

交流スイッチを常時ターンオフとすることで商用系統からの電力潮流をゼロにする。このとき、太陽光発電、双方向変換装置および交流負荷が接続されている交流母線は、双方向変換装置を電圧源とした自立運転状態となる。電源と負荷との需給バランスの不均衡は、双方向変換装置を介した蓄電池の充放電により解消する。自立モードでは、双方向変換装置の出力を商用系統の電圧、周波数、位相に同期させる同期運転(Synchronous operation)と、その電圧・周波数を一定に制御する自立運転(Islanding operation)とを切替できる。本検討では自立運転を用いている。

3.2 連系モード

自立モードにおいて太陽光発電の発電量が需要よりも少なく、蓄電池放電が継続、直流母線の電圧が予め設定したしきい値を下回った場合、交流スイッチに点弧パルスを印加しターンオンさせることで、商用系統からの電力を交流母線に取り込む。また、この際、双方向変換装置に整流(順変換)動作をさせ、蓄電池充電を併せて行う。また、付帯機能として双方向変換装置をアクティブフィルタとして用いることにより、交流負荷で発生した高調波電流の商用系統側への流出を抑制する。

3.3 バックアップモード

連系モード運転中において商用系統に停電、瞬低等の異常が発生した場合には、交流スイッチの点弧パルスをオフにし、電流ゼロのタイミングでサイリスタをターンオフさせる。その動作と並行して、双方向変換装置を定電圧、定周波数でインバータ(逆変換)動作させ、蓄電池からの電気エネルギーを供給することで、交流母線への電力供給を継続する。

4. システム制御パターン

これまでの検討では、蓄電池の充電時に逐一連系する必要があり、間欠的に大きな受電電力が発生するため供給系統側から見ると負荷変動の大きい需要家と言えた。

また、充電時間が気象状況により不規則であり、時間帯

別料金など電気料金低減が可能な契約メニューに対応できないといった課題があった。そこで3.2節の連系モードで商用系統からの受電電力を任意に制御できるよう、双方向変換装置の制御プログラムを改良した。そこで以下の3パターンの制御アルゴリズムを本システムに適用した際のメリット・デメリットを検討した。なお、制御フロー(図3)は通常時のシステム切替え条件のみを示しており、バックアップモード移行への制御フローは省略している。

4.1 パターン1:自立優先制御(従来方式)

この方式は、従来の制御方式⁶⁾である。蓄電池電圧が予め定めた範囲内にある場合、自立モードで運用する。制御フローを図3(a)に示す。蓄電池電圧を逐次計測し、蓄電池電圧が放電終止しきい値(280V)に達した時点で連系モードに切替え、蓄電池充電が進み充電終止しきい値(380V)に達した時点で自立モードに切替える。この制御は、連系する時間を最小化できるが、蓄電池の充電に際し、双方向変換装置の定格容量を最大とする商用系統からの電力を必要とする。また、太陽光発電が出力していない夜間の需要が大きい場合、連系モードと自立モードとの切り替えが頻繁に発生する。

さらに、蓄電池電圧が放電終止しきい値近くにある時に商用系統で異常が発生した場合、バックアップモードで運転継続できる時間が極めて短時間となってしまう。このように、無停電電力供給の観点でバックアップ可能時間が定まらないこともシステム運用上の課題であった。

4.2 パターン2:時間帯別料金追従制御

この方式は、季節別時間帯別料金などの時間帯毎に設定された電力量単価に連動して、電力量単価が安い時間帯に連系し、受電することで蓄電池充電を行う制御である。

電力会社の低圧季節別時間帯別契約における、電力量料金(夏季以外の季節)の一日の推移の一例を図4に示す⁶⁾。また、この低圧季節別時間帯別料金に対応した制御フローを図3に示す。デイトタイム(7-23時)には、制御フロー図3(a)の点線部を図3(b)に変更し、ナイトタイム(23-翌7時)には、制御フローの同部を図3(c)に変更する。

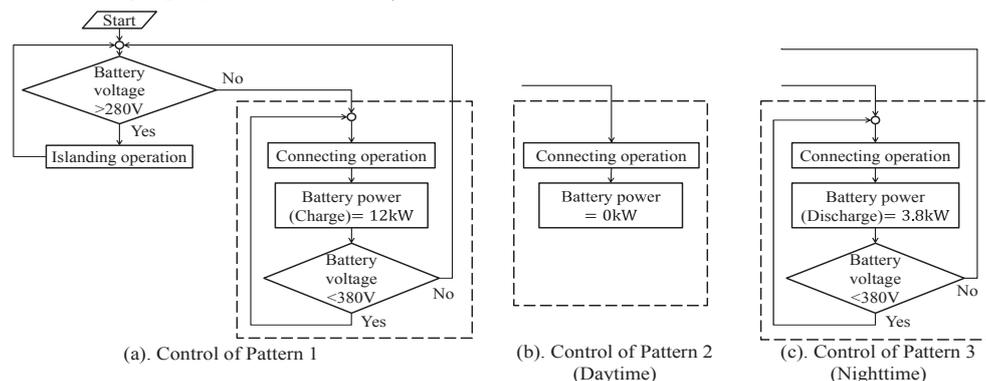


Fig.3. Control flow
図3 制御フロー

パターン1:自立優先制御との相違点として、デイトタイムに連系モードに移行した場合でも、蓄電池の充放電電力を0kWとなるように制御し、蓄電池充電は行わない。ナイトタイム、すなわち翌7時に蓄電池が満充電となるように3.8kWで蓄電池を充電する。この制御の特長は、デイトタイムの受電電力量を抑えることができ、電力量料金を低減できることにある。この連系モード時において、停電等の商用系統異常が発生した場合は、無瞬断で連系モードからバックアップモードへ移行する。バックアップモードの下限蓄電池容量(State of Charge : SOC)は連系モードの下限SOCより小さい値を設定しており、この差分及び太陽光発電電力を電力供給に使用することが可能である。

4.3 パターン3:受電点電力一定制御

商用電力を終日一定量で受電する方式である。この制御における受電点電力 P は、パターン2:時間帯別料金追従制御における受電点電力量 W の1日分を平均した値であり、具体的には以下の(1)、(2)式から導出される。電力損失量 W_{loss} は、受電電力を一度蓄電池に充電し、その後放電して負荷で消費される場合において発生する、双方向変換器の1日の電力損失量の総和を示す。

$$P = W/24 \quad [\text{kW}] \quad \dots(1)$$

$$W = (W_L - W_D) + W_{loss} \quad [\text{kWh}] \quad \dots(2)$$

- W : 受電点電力量 [kWh]
- W_L : 負荷消費電力量 [kWh]
- W_D : 太陽光発電電力量 [kWh]
- W_{loss} : 電力損失量 [kWh]

この方式の特長として、商用系統側から見ると常に一定量買電する需要家であり、(3)式で定義される負荷率 μ は100%となる。

$$\mu = (P_{ave} [\text{kW}]/P_{max} [\text{kW}]) \quad [\%] \quad \dots(3)$$

- P_{ave} : 1日の平均受電電力 [kW]
- P_{max} : 30分間平均最大受電電力 [kW]

従って、電気事業者にとっては配電設備の利用率が向上し、設備投資の抑制に繋がる。また需要家の観点での特長は、受電点電力一定によって最大電力が抑制されるため、(基本料金単価)×(30分間平均の最大需要電力)で求められる電気料金の基本料金部分がパターン1のピーク電力、すなわち双方向変換装置の定格容量の値と比較し安価に抑えられる点にある。また、当パターン3では需給調整に使う蓄電池が、比較的高いSOCで使用出来るため、蓄電池への負担軽減に伴う蓄電池のライフサイクルの長期化が可能となる。

5. 実測およびシミュレーション結果

5.1 運用内容、測定ポイント

今回の実験は、愛知工業大学八草キャンパス内の12号館の交流負荷(照明、空調及びコンセント負荷)に太陽光発電および蓄電池、商用系統で電力を供給した。実験で用いたシステムの構成を図5に示す。計測ポイントは4箇所とし、商用系統からの受電電力をA点、太陽光発電の出力をB点、負荷電力をC点、さらに蓄電池充放電電力をD点で示している。また、計測データは10秒毎に取得している。

5.2 日負荷曲線

前章において、パターン1~3として述べた各制御方式における日負荷曲線の一例を図6~8に示す。本論文では、各方式間の電気料金比較を行うためにパターン1は実運用データを用い、パターン2とパターン3についてはパターン1の交流負荷電力と太陽光発電出力を与条件としたシミュレーションで、受電電力および蓄電池充放電電力を導出した。

パターン1:自立優先制御(図6)では、日中帯(7時00分から16時45分まで)太陽光発電の出力と蓄電池による需給調整で負荷に電力供給している。16時45分から19時15分、翌日の4時30分から7時00分の間、連系モードに移行して蓄電池を充電している。前述のとおり、この制御方法には、現行の電気料金制度における基本料金の上昇や充放電サイクルの増加に伴う、蓄電池早期劣化の課題がある。

パターン2:時間帯電力料金追従制御(図7)では、現行の電気料金制度で電力量料金の安く設定される夜間帯(ナイトタイム)に蓄電池を充電する制御とした。また、デイトタイムの買電量が最小となるように、デイトタイムに蓄電池電圧が放電終止しきい値に至った場合でも、ナイトタイム(23時00分)になるまで16時45分からは系統電力が負荷に電力供給を行い、充電を行わない制御とした。16時45分から30分間系統電力が振動しているのは、交流負荷のON、OFF制御の頻繁な繰り返し等が原因と想定される。

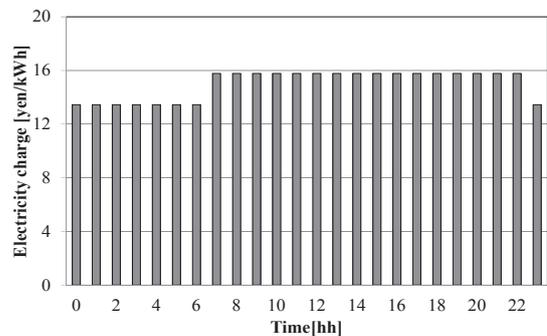


Fig.4. Changes in electricity charge of time

図4 電力量料金時間推移

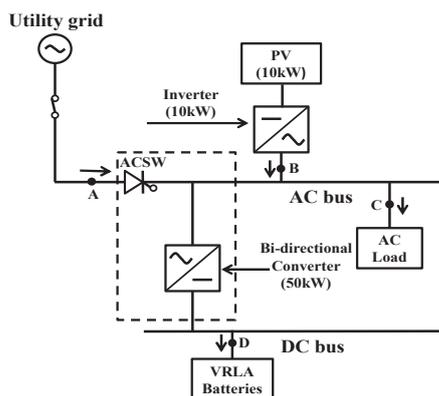


Fig. 5. Measuring points of AC system
図 5 交流システムの測定ポイント

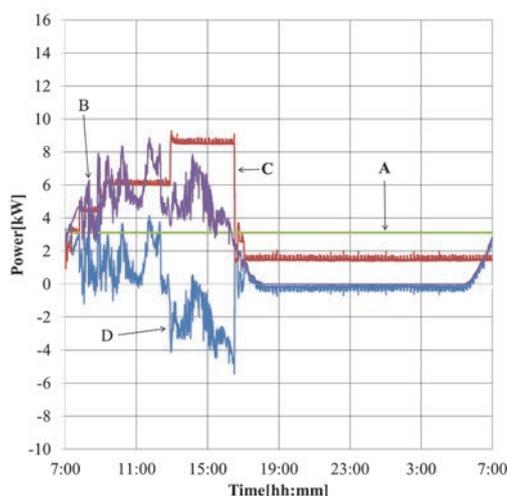


Fig. 8. Pattern3: Day load Curve
(Certain power reception control)

図 8 パターン 3:日負荷曲線(受電点電力一定制御時)

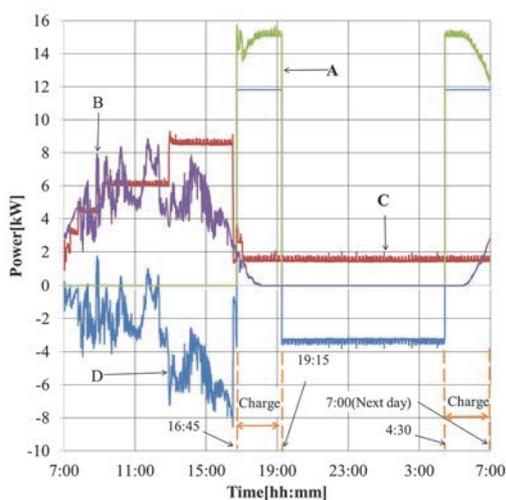


Fig. 6. Pattern1: Day load Curve
(Islanding mode priority control)

図 6 パターン 1:日負荷曲線 (自立優先制御時)

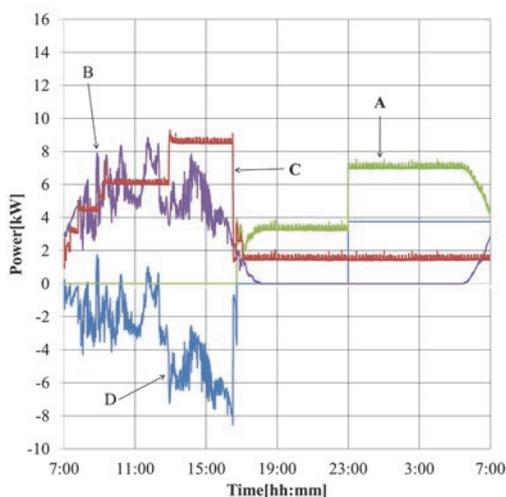


Fig. 7. Pattern2: Day load Curve
(Electricity rates follow up control)

図 7 パターン 2:日負荷曲線
(時間帯別電力料金追従制御時)

パターン 3: 受電点電力一定制御(図 8)では、商用システムからの電力を平準化し、現行の電気料金制度における基本料金を抑制する制御を行った。平準化により終日の受電電力を一定、すなわち負荷率 100%の需要家を実現した。この制御ではシミュレーション開始時(7時 00 分)の蓄電池状態を SOC80%としている。なぜなら、受電点電力一定で受電し続ける最中、需要の小さい状態が続くと、蓄電池充電が継続して SOC が 100%に達するためである。なお、翌 7 時 00 分には SOC80%となるようにし、シミュレーション開始時と終了時の充電状態を同一(SOC80%)にしている。

6. 検討

これまで示した 3 パターンの制御について、現行の電気料金制度における基本料金、電力量料金、および蓄電池の充電状態(SOC)3つの視点で考察する。

6.1 電気料金(基本料金、電力量料金)比較

電気料金削減効果について考察する。電力料金は、(4)式により決定されるものとする。

(基本料金単価[円/kW]×最大電力[kW])+(電力量単価[円/kWh]×購入電力量[kWh]) = 電気料金[円]…(4)

ここで電力量単価については、図 4 に示した低圧季節別時間帯別契約の金額を用い、基本料金単価についても同契約の金額を引用した。また最大電力は、取得データを 30 分間単位に平均化した値を用いた。パターン 1~3 の運転制御を 30 日間(1ヶ月間)継続した場合の電気料金を表 2 に示す。1ヶ月の購入電力量については、図 6-8 の 1 日の実測データまたは導出値の 30 倍とした。表 2 より、パターン 3 の制御はパターン 1 の制御と比較し、基本料金で 80.4%、電気料金全体としては 26.7%低減可能であり、運転制御の工夫により提案システムでコストメリットが得られることを確認した。

Table2. Electricity charges of each operation control
表2 各運転制御による電気料金

	Basic charge	Reduction rate against the basic charge of pattern 1	Energy charge	Electricity charge of a month	Reduction rate against the Electricity charge of pattern 1
Pattern 1	¥18,166		¥32,765	¥50,931	
Pattern 2	¥8,057	55.6%	¥31,459	¥39,516	22.4%
Pattern 3	¥3,564	80.4%	¥33,758	¥37,322	26.7%

6.2 蓄電池の充電状態(SOC)相対度数比較

パターン1~3における1日間の蓄電池の充電状態(SOC)のばらつき(相対度数分布)を図9~図11に示す。これにより、蓄電池の充電状態(SOC)の変動範囲、および滞在時間を確認できる。ここで測定開始から任意の時点(k×10秒時)における充電状態(SOC_k[%])の算出式を(5)式、(6)式、(7)式に示す。

$$W_N = P_N \times \frac{1}{360} \quad [\text{kWh}] \dots\dots\dots (5)$$

$$W_{sum,k} = \sum_{N=1}^k W_N \quad [\text{kWh}] \dots\dots\dots (6)$$

$$SOC_{sum,k} = SOC_0 + \left(\frac{W_{sum,k}}{62} \right) \times 100 \quad [\%] \dots\dots\dots (7)$$

- P_N : 充放電電力値 [kW]
- W_N : 充放電電力量(10秒間) [kWh]
- $W_{sum,k}$: 総和充放電電力量(k×10秒時) [kWh]
- SOC_0 : 蓄電池残容量(測定開始時) [%]
- $SOC_{sum,k}$: 蓄電池残容量(k×10秒時) [%]

ここに、計測データは10秒毎に取得しており、 P_N (-値：放電、+値：充電)は計測開始からN×10秒後に取得した充放電電力値である。計測データ P_N を、 P_{N-1} を取得した時点から10秒間の平均値とみなし、(5)式より10秒間充放電電力量 W_N を導出した。10秒ごとに取得した W_N を用い、(6)式からk×10秒時点における総和充放電電力量 $W_{sum,k}$ を求める。最後にこの値を蓄電池容量(62[kWh])で除した値を用い、(7)式より $SOC_{sum,k}$ を求めた。 SOC_0 は、蓄電池の測定開始時の残容量を示し、パターン1及び2では100%、パターン3では80%である。(ここでNはN×10秒時の値を示す際の変数、kはk×10秒時の総和値を示す時の変数とする。)

パターン1：自立優先制御(図9)では、充電状態(SOC)が100%から45%までの広い範囲で変動しており深い放電深度(Depth of Discharge：DOD)での充放電が周期的に行われている様子を確認できる。二次電池のDODの深さと蓄電池のサイクル寿命には負の相関があり⁹⁾、深いDODでの充放電を頻繁に行うパターン1制御は、比較的早期に蓄電池が寿命に達する可能性があることを示す。

パターン2：時間帯電力料金追従制御(図10)でもパターン1制御と同様に、充電状態(SOC)が100%から45%までの広い範囲で変動しており深いDODでの放電と充電が周期的に行われている様子を確認できる。

パターン3：受電点電力一定制御(図11)では、充電状態(SOC)の変動範囲が94%から75%に限定されている。また、相対度数百分率が72%の割合で充電状態(SOC)が84%から75%に滞在しており、運用の中での蓄電池の充放電への依存性が低減している様子を確認できる。

以上より、蓄電池の充電状態(SOC)の変動範囲は、制御方法により大きく変化し、特にパターン3は、その変動幅を小さく、充電状態(SOC)を高い値で維持している。これによりパターン3は、パターン1、パターン2と比較し深いDODでの充放電サイクル回数を減少させることができ、蓄電池寿命の長期化が可能と考える。

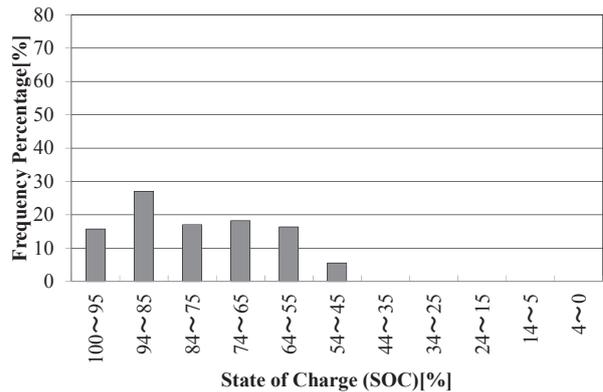


Fig.9. SOC relative frequency of Pattern1 mode
図9 パターン1のSOC相対度数分布

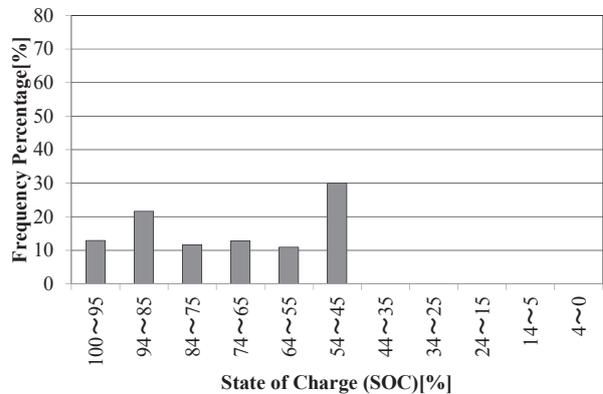


Fig.10. SOC relative frequency of Pattern2 mode
図10 パターン2のSOC相対度数分布

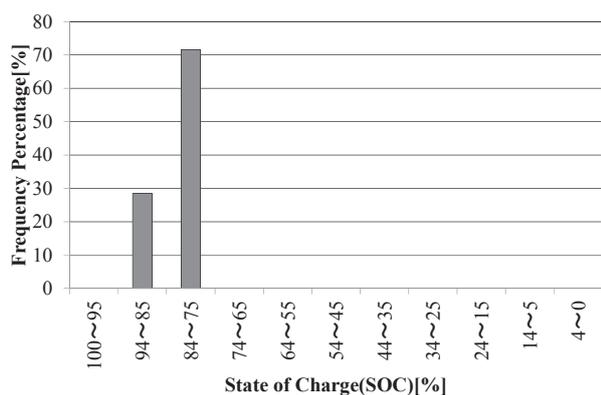


Fig.11. SOC relative frequency of Pattern3 mode

図 11 パターン 3 の SOC 相対度数分布

7. まとめ

本論文では、構築した給電システムにおいて 3 パターンの制御アルゴリズムを適用し、各制御において電気料金、蓄電池の充電状態(SOC)の観点から比較を行い、以下の知見を得た。

- ・ 制御フローに追従したシステム制御を行い、正常に動作を切替えられること。
- ・ パターン 3: 受電点電力一定制御を適用した場合、基本料金で 80.4%削減、電気料金で 26.7%の削減効果が得られること。
- ・ パターン 3: 受電点電力一定制御を適用した場合、蓄電池の深い DOD の充放電サイクル回数低減が可能であること。

今後は、今回検討した制御フロー、特にパターン 3: 受電点電力一定制御で給電システムを実運用し、電気料金低減と蓄電池劣化の実データを取得し、今回示した効果を実証する。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、平成 18 年度文部科学省「私立大学学術研究会高度化推進事業・社会連携推進事業」、「マイクログリッド導入による次世代型発電供給システムの開発」によって構築したシステムを活用した。ここに関係者各位に感謝する。

文 献

- (1) 名古屋洋之“太陽光発電が大量導入された電力系統における蓄電池を用いた負荷周波数制御の一方式”電気学会論文誌 B Vol.132 No.4 pp.325-333
- (2) 林 秀樹“再生可能エネルギー導入をもたらすエネルギー管理と蓄電池制御”電学誌 Vol.12 No.10 (1012)
- (3) Takashi Takeda, Keiichi Hirose, Yoshiaki Okui, Kazuto Yukita, Katsuhiro Ichiyangi” Development of uninterruptible power supply system with distributed generators (DGs)”, INTELEC 2008

- (4) Tetsushi Tsumura, Tomohito Ushirokawa, Takashi Takeda, Masato Mino, Keiichi Hirose ”Power flow control for micro grid with interconnection device using semiconductor-based switch and bidirectional inverter”, INTELEC 2013
- (5) H. Murai¹, T. Takeda, K. Hirose¹, Y. Okui, Y. Iwase, K. Yukita, K. Ichiyangi ” A study on charge patterns for uninterruptible power supply system with distributed generators”, INTELEC 2009
- (6) 廣瀬 圭一, 武田 隆, 奥井 芳明, 雪田 和人, 後藤 泰之, 一柳 勝宏, 松村 年郎“分散形電源導入系統におけるパラレルプロセッシング方式を用いた給電システムの開発”, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌) Vol. 129 (2009), No. 11, pp.1349-1356
- (7) 奥井芳明, “スマートグリッド社会に向けた新たな製品「SANUPS K」の技術について”, 山洋電気テクニカルレポート, No.34, pp.7-11(2012)
- (8) 中部電力 HP <http://www.chuden.co.jp/>より抜粋(20140604 時点)
- (9) 市村 雅弘, “小形リチウムイオン電池の寿命特性”, NTT Building Technology Institute 2005