

## 複数台ノートPCのバッテリー充放電制御による 供給電力最適平準化

角田 忠信<sup>†1</sup> 大島 弘敬<sup>†1</sup> 山本 寛<sup>†1,\*1</sup>  
原 政博<sup>†1</sup> 藤野 信次<sup>†1</sup>

バッテリーの充放電の制御により、商用電源からの総供給電力の時間変動を抑制する電力平準化は、電力消費者の生産活動を低下させずに電気料金削減やCO<sub>2</sub>削減が実現可能な技術として注目されている。単一の大容量バッテリーを用いた電力平準化は、バッテリーの設置にコストがかかるため、本研究はノートPCのような小容量で安価なバッテリーを複数台用いたスケラビリティの高い電力平準化システムの構築を目指している。複数台のバッテリーを用いる場合、各バッテリーの充放電を個別に制御して電力平準化を行っても、総供給電力のピーク値を単一の大容量バッテリーを用いた平準化ほど下げることができない。そこで、本論文は、制御サーバが通信ネットワークを通じて各バッテリーと負荷の状態を監視し、各装置に設置されたスイッチを制御することにより最適電力平準化を実現するシステムにおける、各スイッチのON/OFF制御の実用的アルゴリズムを提案する。本手法では、過去のデータを用いた統計分析よりシステムの総供給可能電力量を算出し、この分の電力量を各装置に対して、各バッテリー残り時間なるべく均一になるように振り分ける。これにより、単一の大容量バッテリーを利用した理想的な電力平準化と同等の効果が得られる。シミュレーションにより評価を行った結果、本手法は複数のバッテリーを個別に制御するよりもピーク電力を削減可能で、理論限界に近い効果を示すことを確認した。

### Optimal Power Leveling by Charge-discharge Control of Multiple Batteries of Laptop PCs

TADANOBU TSUNODA,<sup>†1</sup> HIROTAKA OSHIMA,<sup>†1</sup>  
HIROSHI YAMAMOTO,<sup>†1,\*1</sup> MASAHIRO HARA<sup>†1</sup>  
and NOBUTSUGU FUJINO<sup>†1</sup>

Power leveling technique with batteries receives much attention as a technology that can reduce CO<sub>2</sub> emission and cut the cost of power rate. The goal of our research is to create a power leveling system, which consists of multiple

small and inexpensive batteries such as laptop PCs'. It is difficult to realize optimal power leveling with methods that charge-discharge power of each battery is individually controlled. We propose a novel switching algorithm, which can be applied in the environment where batteries in the system are connected with a central control server through a communications network. Each battery has a switch that controls charge-discharge power. The server decides threshold values, which indicate optimal power energy that should be supplied to each battery and load. Those values are calculated using statistical analysis with past total power demand of all loads. Then according to the threshold values the server controls each switch through the network to realize optimal power leveling by which all batteries operate as if there was only single big battery connected with all loads. We have evaluated our algorithm by a simulation and its results have showed that our central controlled method is better than individually controlled one.

#### 1. はじめに

家庭やオフィスにおける空調や照明、PCなどの家電製品に代表される電力消費負荷の需用する電力は、時間帯により変動する。この変動を平準化して供給電力のピークカットをすることにより、ユーザの電力会社との電気代のブレーカ契約およびデマンド契約における基本料金を削減することが可能となる。また、電力の供給側では、送電設備の容量を負荷需用電力のピークに合わせたものに設計する必要があるが、電力平準化により設備を小規模化してコストを削減することが可能になる。さらに、需用電力が1日を通して大きく変動する場合は、出力の制御が容易であるもののCO<sub>2</sub>発生量が多い火力発電に頼る必要があるが、変動を平準化することにより、CO<sub>2</sub>発生量が少ない原子力発電による電力供給が可能になる。このような背景から、電力平準化は電力技術分野で注目されている。

近年、情報家電やスマートグリッド<sup>1)</sup>に関する研究開発がさかんに行われており、近い将来、通信ネットワークを通じて様々な電気機器を遠隔から制御することが可能になると考えられる。本研究ではこのような将来の環境を想定し、情報通信技術を応用することによる効率的で効果の高い電力平準化を実現する手法の検討を行っている。

供給電力を平準化するためには、たとえばエアコンの設定温度を変更したり照明を制御し

<sup>†1</sup> 株式会社富士通研究所  
FUJITSU LABORATORIES LTD.

\*1 現在、長岡技術科学大学  
Presently with Nagaoka University of Technology

たりするなど、負荷需用電力自体を制御する方法や、送電システムから見てユーザ側に小型発電機を設置する方法などがある。本研究は、これらの方法とは異なり、配電網に設置したバッテリーの充放電を制御することで、供給電力の変動を抑制する電力平準化手法に着目する。バッテリーを用いた電力平準化では、負荷需用電力が高い時間帯にバッテリーから電力消費負荷へ放電を行うことにより商用電源からの供給電力のピークをカットする。また、負荷需用電力が低い時間帯においては商用電源からバッテリーへ充電を行う。これにより、負荷への供給電力量を変化させなくても電力のピークカットが可能となるため、ユーザに対して電気機器の使用を控えさせるような負担を強いる必要がなくなる。

バッテリーを用いた電力平準化のうち、単一のバッテリーを用いたシステムでは、全負荷が需用する電力のピークを賄うことが可能な大容量バッテリーが必要であるため、コストがかかる。一方で、複数の分散配置されたバッテリーを用いるシステムは、ノート PC のバッテリーのように小容量の安価なもので実現が可能である。また、電力消費負荷の増減にともなうバッテリーの追加や移動、撤去が容易であり、スケラビリティの点で優れていると考えられる。ただし、複数台の分散バッテリーを用いる場合、各装置の充放電を個別に制御して電力平準化を行っても最適な平準化はできない。なぜならば、総供給電力のピーク値は個々の装置におけるピーク電力の総計値となるためであり、単一の大容量バッテリーを用いた電力平準化に比べて効果は低下する。

そこで我々は、制御サーバが通信ネットワークを通じて各バッテリーと負荷の状態を監視し、各装置に設置されたスイッチを適切に制御するという方式により、ノート PC のような小容量のバッテリーが付随する装置を複数台用いて電力平準化を実現するシステムの構築を検討している。本システムのような構成をとることにより、既存のノート PC を、手を加えることなくそのまま電力平準化に適用することが可能となる。本論文では、電気料金のデマンド契約における基本料金の削減を見据え、30 分などの一定期間ごとの電力の平均値をとった場合に、そのピーク値を最適平準化するアルゴリズムを提案する（以下、この一定期間を、デマンド期間と呼ぶ）。本論文では、提案アルゴリズムについて計算機シミュレーションを用いて評価することで、ノート PC に付随しているような小規模なバッテリーを複数用いた場合でも、単一の大容量バッテリーを利用した場合と同等の平準化効果が得られることを示す。

本論文の構成は以下になる。まず、2 章で従来の電力平準化手法とその問題点を述べる。3 章で本論文の提案手法である複数台のバッテリーを用いた最適電力平準化アルゴリズムについて述べる。4 章で、3 章で述べたアルゴリズムをシミュレーションにより評価する。5 章で、3 章で述べたアルゴリズムにおける、全体目標値の設定方法について述べる。6 章

で本論文をまとめる。

## 2. 従来研究

従来、電力の平準化を目的として配電網に設置したバッテリーの充放電を制御する方法が提案されている。その基本的な手法は、商用電源から供給される電力に対して供給可能な電力の目標値である閾値電力を設定し、電力消費負荷の需用電力値が閾値を超えた場合に、超過分をバッテリーから放電を行い、需用電力値が閾値以下の場合にバッテリーに充電を行うという方法である<sup>2)</sup>。負荷需用電力のピークとなる時間帯を予測し、バッテリーから放電を行う期間をその時間帯付近に適切に設定して制御を行う手法<sup>3)</sup>もある。

また、バッテリーのみではなく、太陽光発電<sup>4)</sup> や風力発電<sup>5),6)</sup>などを併用して電力の平準化を行う手法が提案されている。複数のバッテリーを一か所に集中して配置することにより、大容量のバッテリーを 1 つ設置した場合と同等の効果を得るようにする手法もある<sup>7)</sup>。さらに、ノート PC のバッテリーを用いて負荷平準化を試みる従来手法もある<sup>8)</sup>。本手法では電源と負荷およびバッテリーとの間にスイッチを設け、スイッチの ON/OFF を制御することにより供給電力のピークカットを行う。以上のような従来技術を用いることにより、単一のバッテリーを用いたシステムにおいては、最適な電力平準化が可能であると考えられる。

しかし、以上に述べたようなバッテリーごとに個別に充放電の制御を行う手法を、分散配置された個々のバッテリーへ適用しても最適な制御はできない。これは、個別に各バッテリー内でのみ充放電を制御して平準化を行う手法（個別制御）を行う場合、商用電源からの総電力のピークはそれぞれのバッテリーにおいて最適制御を行った場合のピーク電力の総和以下に下げられないためである。たとえば、図 1 に示すように、3 台のバッテリーを用いて、個別に充放電を制御して電力平準化を行う場合を考える。このとき、個々の装置のみを見ると最適に電力が平準化されているものの、それらを足し合わせた商用電源からの総供給電力は最適に平準化されていない。分散配置された複数のバッテリーを用いて最適な平準化を行うためには、各装置を個々に制御するのではなく、システム内の各装置の状態を監視し、各装置が連携して全体最適となるような制御を行う必要がある。

近年、スマートグリッドに関する研究がさかんに行われつつあり、従来の平準化手法に情報通信技術を応用することにより、前述の問題を解消できると考えられる。これまでのスマートグリッド環境を想定した電力制御技術がいくつか提案されている<sup>9),10)</sup>。電力平準化技術に関しては、通信ネットワークを通じて複数の機器の総消費電力を観測し、事前に設定されたある閾値電力を超えるとバッテリー放電を行うようにする技術が提案されてい

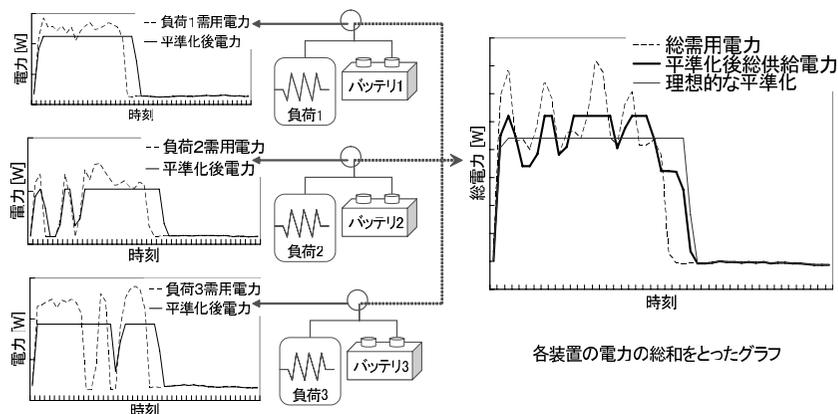


図 1 個別に平準化制御を行う場合の総供給電力  
Fig. 1 Summation of power supply by individual power leveling control.

る<sup>11)</sup>。しかし、本手法は、各バッテリーの残量を考慮したものではないため、複数のバッテリーを単一の大容量バッテリーと見なして制御を行うことはできず、単一バッテリーの場合と同等の効果(3.3節で述べる理論限界)を得ることはできない。また、同様の手法として、通信ネットワークを通じて分散電源を制御し、電力平準化を試みる方式もある<sup>12),13)</sup>。これらの手法も前記の手法と同様に、単一大容量バッテリーと見なして制御を行っていないうえ、バッテリー以外に発電機などの装置を用いたシステムであるため、総供給電力量を増加させずに平準化を行うことはできない。

### 3. 複数バッテリーの充放電集中制御による供給電力最適平準化

#### 3.1 複数のバッテリーを用いた電力平準化システム

本論文では図 2 に示すように、電力線で接続されたバッテリーと電力消費負荷のペアが複数あり、各ペアごとに設置されたスイッチを介して個別に商用電源から電力の供給を受けるようなシステムを対象とする。ここで、これらのペアどうしでは電力の直接的な交換を行うことはできないものとする。すなわち、電力を融通しあうために、商用電源からの電力線とは別にバッテリー間を接続する電力線を設置したり、逆流潮によりバッテリーから商用電源側へ電力を供給したりすることは不可とする。

さらに本論文が対象とするシステムでは、これらのペアは通信ネットワークを通じて制御

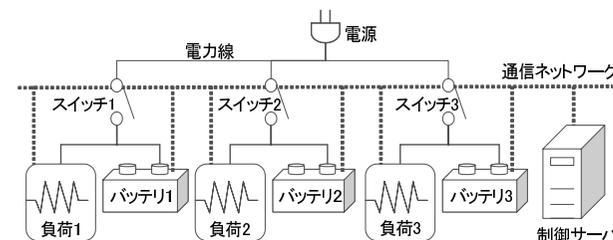


図 2 通信ネットワークで接続された複数のバッテリーとスイッチと制御サーバを用いた総供給電力平準化システムのイメージ  
Fig. 2 An image of a power leveling system with multiple batteries and switches with a control server through a communications network.

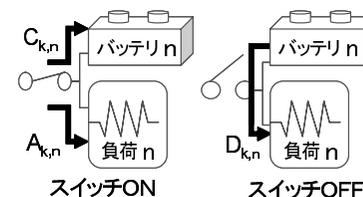


図 3 スイッチの ON/OFF によるバッテリーと負荷への電力供給の様子  
Fig. 3 An image of power supply when the switch is on or off.

サーバと接続するものとする。制御サーバはシステムの状態を考慮に入れて各装置の適切な充放電量を算出し、その結果から各バッテリーや負荷と電源との間に設置されたスイッチを遠隔制御し、各バッテリーの充放電量の制御を行う装置である。各スイッチは、たとえば、インターネットなどを通じて電源供給の ON/OFF が可能な機器<sup>14)</sup>を想定している。また、このようなスイッチ機能は、ノート PC 内に内蔵されているものでもよい。スイッチによる給電に関しては、一般的なノート PC への電力供給方法と同様に、図 3 に示すように、スイッチ ON 時には電源からバッテリーと負荷へ同時に給電が行われ、スイッチ OFF 時はバッテリーから負荷へ放電が行われるものとする。

本論文が対象とするシステムで用いるバッテリーは、一般的なノート PC に付随するものを利用することを想定しているが、本論文の提案手法は、小容量の UPS など他の蓄電装置に対して適用することも可能である。また、バッテリーの充放電に関しては、バッテリーに設定された定格に従って行うことを想定する。一般的に、バッテリーの充電レートは、バッテリー容量により決定される。本システムで用いるようなノート PC には、多くの場合リチウムイ

オンバッテリーが用いられる。リチウムイオンバッテリーは 1 [C] 以下で充電するのが適切であるとされており、本論文における充電レートも同様に 1 [C] 以下で充電を行うことを仮定する。ここで、1 [C] とは、バッテリーを空の状態から 1 時間で満充電にするための電流値であり、たとえば、2,000 [mAh] (電圧値が 10 [V] の一定電圧の場合 20 [Wh]) の容量のバッテリーにおける 1 [C] は、2,000 [mA] (20 [W]) である。

### 3.2 アルゴリズムの概要

本論文は、電気料金のデマンド契約における基本料金の削減を見据え、デマンド期間 (30 分) ごとに商用電源から供給される電力の平均値をとった場合の、その値のピーク値を最小化するための電力平準化アルゴリズムを提案する。

本アルゴリズムは、図 2 で示した複数のバッテリーにスイッチが接続されているシステムにおいて、まず、デマンド期間内に各装置に供給可能な総電力量 (全体目標値) を決定し、その値をもとに、装置ごとの供給可能電力量 (個別目標値) を算出する。そして、各装置の個別目標値に従い、各スイッチの ON/OFF をサーバが指令することにより、各バッテリーの充放電を制御し、電力平準化を実現する。全体目標値と個別目標値の具体的な算出方法については、それぞれ 3.4 節と 3.5 節で述べる。

本アルゴリズムは夜間に全体目標値の算出処理を必要とするが、その時間は短時間であり、1 日を通してみると計算量は大きくならない。また、5 章で述べる統計分析を用いる場合は、探索問題を解く必要はない。したがって、本システム構築のために大型の計算機を用意する必要はなく、小型で省電力の計算機を導入するか、既存の計算機リソースを用いることにより電力平準化システムの構築が可能である。たとえ新たに小型の計算機を使用しても、ピークカット分の電力と比較してサーバ稼働分の電力は無視できるほど小さいものになり、電力平準化のメリットを享受できると考えられる。

### 3.3 平準化の理論限界

本論文で提案するアルゴリズムの詳細を説明する前に、複数のバッテリーを用いた電力平準化システムにおける平準化の理論限界について述べる。ここで、本論文における理論限界とは、電力平準化システムにより達成可能なピーク電力の最小値を指すものとする。複数のバッテリーを用いた電力平準化システムにおける理論限界は、全バッテリーの総容量と等しい容量を備える単一のバッテリーが配電網に設置され、すべての電力消費負荷に対して最適に充放電制御を行った場合のピーク値に等しい。

一般的に、単一のバッテリーを用いる場合、電力消費負荷が需用する電力が、事前に設定した平準化の目標値である閾値電力を超える時間帯にその超過分をバッテリーから放電するが、

放電時間帯が終了した直後にバッテリーが空になるように閾値を決定し、充放電を制御するアルゴリズムが最適となる。

また、複数のバッテリーを用いるシステムにおいては、それらのバッテリー残量の総和の変化が、単一のバッテリーを用いる場合と等しくなるように充放電量を制御することにより、単一のバッテリーを用いた場合と同等の平準化効果が得られる。このような状態は、すべてのバッテリーの残り時間がつねに一致するように各バッテリーの充放電を制御することが可能であれば実現できる。これは以下に示す式により簡単に説明が可能である。

まず、バッテリー  $i$  の容量を  $B_i^c$ 、それに接続する負荷  $i$  の平均需用電力を  $\bar{l}_i$  とおき、平準化開始時  $t = 0$  からある時点  $t = t_s$  までにバッテリー  $i$  から負荷  $i$  に放電する電力量を  $D_i^s$  とおく。バッテリーの残り時間を  $\tau_r$  とおくと、すべてのバッテリーの組合せ  $(i, j)$  に関して、 $\tau_r = (B_i^c - D_i^s)/\bar{l}_i = (B_j^c - D_j^s)/\bar{l}_j$  となる。ここで、前式ですべての装置に関して和をとることにより、 $\tau_r = (\sum_i B_i^c - \sum_i D_i^s) / \sum_i \bar{l}_i$  が導出される。本式は、容量  $\sum_i B_i^c$  の単一バッテリーに対してすべての負荷を接続し、バッテリーから電力量  $\sum_i D_i^s$  を放電してバッテリーの残り時間を  $\tau_r$  とする制御と、複数のバッテリーによる制御が等しく見なせることを示している。

本論文では、複数のバッテリーを単一バッテリーと見なして算出した目標値電力を用いて、全バッテリーの残り時間を一致させるバッテリーの充放電値の計算手法を提案する。また、負荷需用電力/バッテリー残量の比に差が生じる場合は、前述のように各バッテリーの残り時間を一致させることは困難になるが、本論文では、各バッテリーの残量をなるべく均一化させる例外処理により、残量が最小となる時刻がすべての装置でほぼ一致するように各バッテリーの充放電値を決定するアルゴリズムを提案する。本充放電値に基づいて各スイッチの ON/OFF 制御を行うことにより、複数のバッテリーを用いた場合でも理論限界に近い電力平準化が可能になる。

### 3.4 全体目標値の決定

全体目標値とは、デマンド期間内に商用電源から各電力消費負荷やバッテリーへ供給可能な総電力量の値である。本アルゴリズムでは、商用電源からデマンド期間内に供給される電力量が事前に設定した全体目標値以下の値になるように、制御サーバが各スイッチの ON/OFF を切り替える。各デマンド期間内に全負荷に対して供給される総電力の平均値のピーク値は、平準化が適切に行われれば [全体目標値]/[デマンド期間の時間間隔] 以下に抑えることが可能である。

ここで、全体目標値は平準化を実施する期間 (例: 1 日) 中は固定とするため、制御サー

バは全体目標値の決定を制御対象となる期間の最初（平準化制御開始前の夜間）に 1 度だけ行えばよい。したがって、平準化期間全体でみると計算量は大きくならない。

もし、全負荷の総需用電力の時間変動が完全に予測可能であれば、前述した供給電力の平均値のピークが最小となる理想的な全体目標値を PSO ( Particle Swarm Optimization )<sup>15)</sup> などの探索手法を用いて導出することが可能である。しかし、全負荷の総需用電力の正確な予測が困難なとき、PSO を用いても最適な全体目標値を算出できない。この場合、過去の総需用電力の変化の情報から統計分析を用いることにより、最適に近い全体目標値を算出する。本手法の詳細は 5 章で述べる。

また、全体目標値の決定に際して、負荷需用電力の時間変動に関する情報は、負荷それぞれの個別の値を必要とせず、全負荷の需用電力の総計値情報があればよい。なぜなら、容量が全バッテリーの総容量と等しい単一バッテリーにすべての電力消費負荷が接続している電力平準化システムを想定したとき、そのシステムにおいて供給電力のピークを最小とする全体目標値が、複数のバッテリーを用いたシステムにおいても理想的な全体目標値となるからである。このとき、単一バッテリーに接続している複数の負荷に関しては、それらをまとめて 1 つの負荷であると考えることが可能である。ゆえに、全体目標値は全負荷の総需用電力の時間変動の情報から算出することが可能である。

### 3.5 個別目標値の算出

制御サーバは、算出した全体目標値分の電力量を各バッテリーに振り分けることにより、各バッテリーに対する個別目標値を決定する。個別目標値は、設定されたバッテリーおよびそれに接続される電力消費負荷に対して商用電源から供給可能な電力量を示す。各スイッチは、商用電源から供給される電力量が個別目標値に達するまで ON とする。そして、供給電力量が個別目標値に達するとスイッチを OFF とする。スイッチが OFF になると、それに接続された電力消費負荷に対してバッテリーから放電される（図 4）。ここで、全体目標値が平準化実施期間中は値が固定であるのに対して、制御サーバは各装置の個別目標値をデマンド期間ごとに再計算する。

次に、具体的な個別目標値の導出方法について述べる。以下、負荷  $n$  とバッテリー  $n$  とのペアを装置  $n$  と呼ぶことにする。全体目標値を  $P$ 、装置  $n$  の時刻  $t$  における個別目標値を  $p_n(t)$ 、デマンド期間  $[T_k, T_{k+1}]$  において装置  $n$  の負荷  $n$  に電源から供給する電力量を  $A_{k,n}$ 、電源からバッテリー  $n$  に充電する電力量を  $C_{k,n}$  とおくと、個別目標値の定義より  $p_n(T_k) = A_{k,n} + C_{k,n}$  であるため、次式が成り立つ。

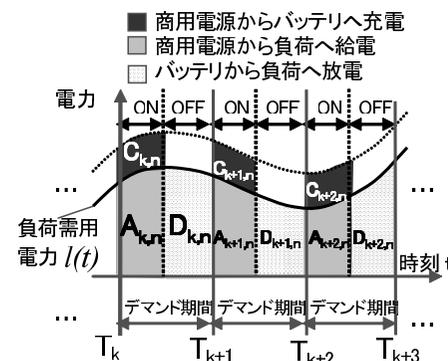


図 4 スwitchの ON/OFF によるバッテリーへの充放電電力量および負荷への供給電力量と負荷需用電力との関係  
Fig.4 Relation between charge-discharge power energy to battery  $n$ , supply power energy to load  $n$ , and demand power of the load when the switch is on or off.

$$P = \sum_i p_i(T_k) = \sum_i (A_{k,i} + C_{k,i}) \tag{1}$$

デマンド期間  $[T_k, T_{k+1}]$  に装置  $n$  のバッテリー  $n$  から負荷  $n$  へ放電する電力量を  $D_{k,n}$ 、負荷  $n$  が需用する電力量を  $L_{k,n}$  とおくと、 $L_{k,n} = A_{k,n} + D_{k,n}$  である。また、時刻  $t$  における装置  $n$  のバッテリー残量を  $B_n(t)$  とする。ここで、バッテリー残量をデマンド期間内の需用電力量で割った値を、バッテリー残り時間と定義する。そして、全バッテリーの残量なるべく均一になるように制御するという本アルゴリズムの基本方針により、すべてのバッテリーの組合せ  $(i, j)$  に関して、デマンド期間終了時  $(t = T_{k+1})$  にバッテリー  $i$  とバッテリー  $j$  の残り時間を等しくするため、次式が成立するようにデマンド期間開始時  $(t = T_k)$  に個別目標値の決定を行う。

$$\frac{B_i(T_k) + C_{k,i} - D_{k,i}}{L_{k,i}} = \frac{B_j(T_k) + C_{k,j} - D_{k,j}}{L_{k,j}} \tag{2}$$

式 (1) と式 (2) により、装置  $n$  のデマンド期間開始時  $(t = T_k)$  において設定すべき個別目標値  $p_n(T_k)$  は以下ようになる。

$$p_n(T_k) = \frac{L_{k,n}}{\sum_i L_{k,i}} \cdot \left\{ P + \sum_i B_i(T_k) \right\} - B_n(T_k) \tag{3}$$

### 3.6 個別目標値算出の例外処理

式 (3) から算出される個別目標値を用いてスイッチの ON/OFF を制御することにより、すべてのバッテリーの残り時間を当該デマンド期間後に一致させることが可能であり、これにより理論限界と同じ効果が得られる制御が可能である。

ただし、この式を用いて算出した個別目標値が負の値となる場合や、算出結果が大きな値となり、電源から給電し続けてもデマンド期間内に個別目標値分の電力量を使いきれない場合がある。このような値が得られる場合は、算出結果どおりの制御を行うことが不可能である。そして、このような値は、各装置の負荷需用電力量/バッテリー残量の比の値に比較的大きな差が生じる場合に算出される。このとき、完全にはデマンド期間後の各バッテリーの残り時間を一致させることはできないが、以下の例外処理を実施することにより、全バッテリーの残量をなるべく均一化させ、本例外処理と式 (3) を繰り返し適用して、結果的に残量が最小となる時刻をすべての装置でほぼ一致させることにより、容量が複数バッテリーの総容量と等しい単一バッテリーにおける平準化制御と効果が等しくなるようにする。

ここで、デマンド期間  $[T_k, T_{k+1}]$  において電源からバッテリー  $n$  に充電可能な電力量の最大値を  $C'_{k,n}$  とおく。この値はデマンド期間中装置  $n$  のスイッチを ON にし続けた場合の電源からバッテリーへの充電電力量であり、バッテリーの特性を事前に把握していれば、現在の残量を測定することにより、値を決定することが可能である。また、充電期間中の充電電力はほぼ一定になることから、デマンド期間中の充電量の最大値を近似的に算出することも可能である。

- $p_n(T_k) < 0$  となる装置が存在する場合  
当該装置の個別目標値を  $p_n(T_k) = 0$  とし、その装置を除いた残りの装置で個別目標値の再計算を行う。再計算は  $p_n(T_k) < 0$  となる装置が出現しなくなるまで繰り返す。
- $p_n(T_k) > L_{k,n} + C'_{k,n}$  となる装置が存在する場合  
個別目標値の余り分  $[p_n(T_k) - (L_{k,n} + C'_{k,n})]$  を別のバッテリー残量が少ない装置に追加し、当該装置の個別目標値を  $p_n(T_k) = L_{k,n} + C'_{k,n}$  とする。

本処理を含めた各個別目標値の設定方法を示すフローチャートを図 5 に示す。本手順により、どのような負荷需用電力量・バッテリー残量の場合でもスイッチの ON/OFF 制御ができる適切な個別目標値の算出を行うことが可能である。

本例外処理が発生するときは各バッテリーの残量は正確には一致しない。よって、負荷需用電力/バッテリー残量の比に著しく差がある場合はこの例外処理が頻発し、各バッテリーが均一にならなくなるため、最適平準化とはならないと考えられる。たとえば、ある負荷・バッテ

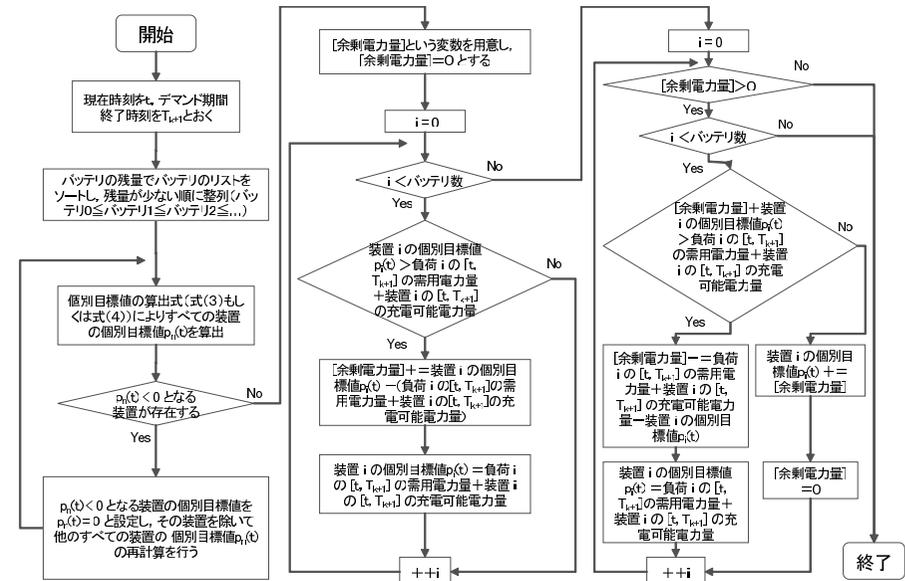


図 5 個別目標値  $p_n(t)$  の決定を行うフローチャート  
Fig. 5 A flow chart that decides individual target value  $p_n(t)$  of every device.

リのペアにおいて、負荷需用電力量がバッテリー容量に対して非常に大きく、なおかつ、他のペアにおいて、バッテリー容量が十分大きいものの、負荷需用電力が非常に小さい場合、そのバッテリーに充電された電力は十分に活用できない。よって、全体で見ると単一バッテリーの場合のような最適平準化はできないことになる。このような例が前述の例外処理が多く発生するケースに相当する。

しかし、負荷需用電力/バッテリー容量の比の値に差が生じる場合でも、その差が極端に大きな値でなければ、前述の例外処理により、各バッテリーの残量をほぼ均一化することが可能になるため、容量が複数バッテリーの総容量と等しい単一バッテリーにおける平準化と効果はほぼ等しくなる。また、本論文で対象としているような、ノート PC のバッテリーを用いてその負荷消費電力を平準化するというケースにおいては、バッテリーの残量を短時間で使いきってしまうような大きな負荷を接続することは考えにくく、負荷需用電力/バッテリー容量の比の値が著しく大きくなることはないため、本アルゴリズムの適用は問題ないと考えられる。

### 3.7 負荷需用電力の予測値の利用

式 (3) において、デマンド期間開始時 ( $t = T_k$ ) においてデマンド期間  $[T_k, T_{k+1}]$  の負荷需用電力量  $L_{k,n}$  をあらかじめ知ることは困難である場合がある。この場合、 $T_k \leq t < T_{k+1}$  としたとき、区間  $[T_k, t]$  における過去の負荷需用電力値と、区間  $[t, T_{k+1}]$  の負荷需用電力の予測値とを用いることにより最適値に近い個別目標値を算出することが可能である。

時刻  $t$  における負荷  $n$  の実際の需用電力を  $l_n(t)$ 、負荷  $n$  の需用電力の予測値を  $\hat{l}_n(t)$ 、電源から負荷  $n$  への供給電力を  $a_n(t)$ 、電源からバッテリー  $n$  への充電電力を  $c_n(t)$ 、デマンド期間開始時から現在までの過去の実測値への重みを  $w$  とおき、式 (3) を以下のように書き換える。

$$p_n(t) = \frac{w \cdot \int_{T_k}^t l_n(\tau) d\tau + \int_t^{T_{k+1}} \hat{l}_n(\tau) d\tau}{\sum_i \left\{ w \cdot \int_{T_k}^t l_i(\tau) d\tau + \int_t^{T_{k+1}} \hat{l}_i(\tau) d\tau \right\}} \cdot \left[ P - \sum_i \int_{T_k}^t \{ a_i(\tau) + c_i(\tau) \} d\tau + \sum_i B_i(t) \right] - B_n(t) \quad (4)$$

ここで、 $L_{k,n} = \int_{T_k}^{T_{k+1}} l_n(\tau) d\tau$ 、 $A_{k,n} = \int_{T_k}^{T_{k+1}} a_n(\tau) d\tau$ 、 $C_{k,n} = \int_{T_k}^{T_{k+1}} c_n(\tau) d\tau$  である。また、式 (4) の時刻を  $t = T_k$  とすると、式 (3) と一致する。デマンド期間  $[T_k, T_{k+1}]$  内に定期的に (たとえば 1 分ごとに) 式 (4) を用いて個別目標値を再計算することにより、最適な制御を行うことが可能となる。具体的な制御に関しては、図 5 のフローチャートの式を本式に置き換えるだけである。

## 4. シミュレーションによる評価

### 4.1 シミュレーションの条件

本章では、提案した充放電制御アルゴリズムの有効性を、計算機シミュレーションにより評価する。本シミュレーションでは 10 台のノート PC を対象として、1 日の総供給電力を平準化するシステムを想定する。デマンド期間は 30 分とする。なお、本論文ではノート PC を 10 台用いたシミュレーション評価のみを示すが、負荷の種類やその台数を変えるなどしていくつかのパターンで試行したところ、いずれもほぼ同様の結果を得たため、このほかの条件のシミュレーションに関しては割愛した。ただし、いずれのパターンにおいてもバッテリー容量に対して負荷需用電力量の値が大きすぎることなく、また、負荷需用電力量が

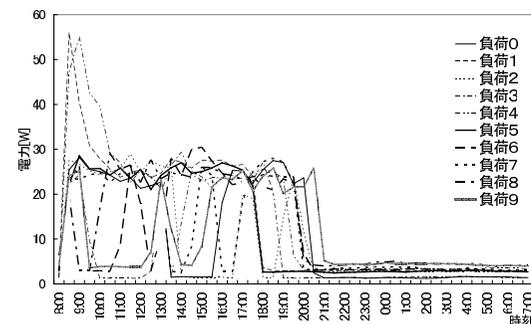


図 6 シミュレーションに用いたノート PC の消費電力のパターン  
Fig. 6 Data of power consumption of laptop PCs for the simulation.

1 日中低い状態にあるものではないものを用いた。

本シミュレーションにおいて、各ノート PC に接続されたバッテリーをそれぞれバッテリー 0、バッテリー 1、バッテリー 2、...、バッテリー 9 とする。本シミュレーションにおいて各バッテリーの容量は、容量を変化させた場合の評価である 4.2.3 項を除き、各負荷の 1 日の需用電力量の 10% に相当する 27.1 [Wh] であるとした。バッテリーの充電レートはバッテリーの容量に対して、0.4 [C] 相当である 10 [W] の充電レートで充電を行うと仮定した。

また、各電力消費負荷の需用電力値に関しては、事前にあるオフィス内において実際に使用されているノート PC の消費電力のある 1 日 (日付  $d_s$ ) の時間変動を 10 台分計測し、その値をシミュレーションにおける負荷需用値として利用することにした。この負荷のパターンを図 6 に示す。

提案アルゴリズムに関しては式 (4) の適用を考慮し、当該オフィス内において実際に使用されているノート PC の消費電力の 2 カ月分の時間変動を計測し、各時刻における平均値を時刻  $t$  における需用電力の予測値  $\hat{l}_n(t)$  とした。また、デマンド期間開始時から現在までの過去の実測値への重みを  $w = 10$  とした。式 (4) を用いた個別目標値計算の間隔は 1 分ごととした。全体目標値  $P$  の設定に関しては、あらかじめ最適値が得られるものと仮定し、需用電力の予測値  $\hat{l}_n(t)$  を用いず、日付  $d_s$  の総需用電力の実測データから PSO を用いて最適な全体目標値を算出した。ただし、実際の運用においては 5 章で述べる全体目標値設定法を利用することを想定している。

本シミュレーションの比較対象として、制御サーバによる集中制御を行わず、個別に各バッテリー内でのみ最適平準化制御を行う手法を、以下では個別制御と呼ぶことにする。ま

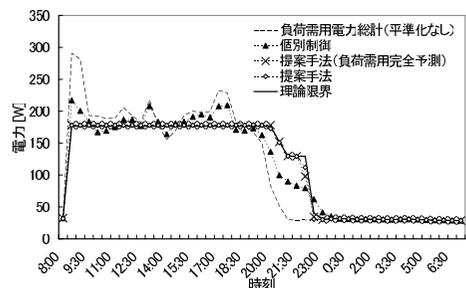


図 7 総供給電力の比較

Fig. 7 A comparison of power supply.

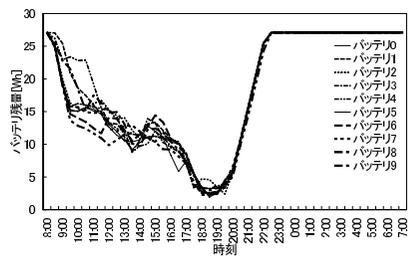


図 8 提案手法における各バッテリーの残量の時間変動

Fig. 8 Transition of all battery levels by proposed method.

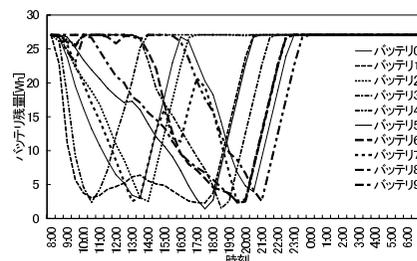


図 9 個別制御における各バッテリー残量の時間変動

Fig. 9 Transition of all battery levels by individual control method.

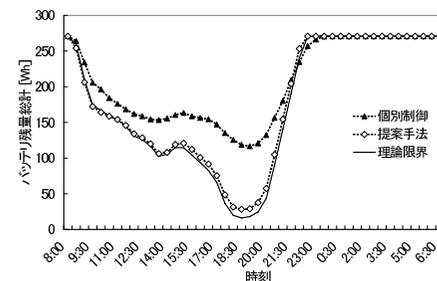


図 10 バッテリー残量の総和の比較

Fig. 10 A comparison of transition of summation of all battery levels between proposed method and individual control method.

た、各バッテリーの総容量と等しい容量の単一のバッテリーを用いて総供給電力の平準化を行うことを想定し、最適平準化制御により得られた結果を以下では理論限界と呼ぶことにする。

## 4.2 シミュレーション結果

### 4.2.1 総供給電力の時間変動の比較

図 7 に負荷需用電力の総計、個別制御を行った場合の商用電源からの総供給電力、提案手法において、負荷需用電力が完全に予測可能で、式 (3) を使用した場合の商用電源からの総供給電力、提案手法において、2 カ月間の消費電力データの平均値を予測値  $\hat{I}_n(t)$  として、式 (4) を用いて負荷需用電力全体最適制御を行った場合の商用電源からの総供給電力、および、総供給電力の理論限界の時間変動を示す。ここで、負荷需用電力の総計は、平準化制御を行わない場合の商用電源から供給される電力の総和に等しい。

個別に各バッテリーに対して最適平準化制御を適用した場合、平準化制御を適用しない場合と比べて供給電力のピーク値は削減されるものの、時間の経過とともに供給電力が変化しているため、全体で最適な平準化が行われていないということが分かる。一方、提案手法では最適な平準化が行われ、個別に最適平準化制御を行った場合と比べて、ピーク電力を低くすることが可能であり、全バッテリーの総容量に等しい大容量のバッテリーを用いた場合とほぼ同じ平準化効果が得られるということが示されている。また、負荷需用電力が完全に予測が可能でない場合も、式 (4) を用いることにより、完全予測が可能な場合とほぼ同じ結果が得られるということが示されている。

### 4.2.2 バッテリー残量

図 8 と図 9 はそれぞれ本提案手法および個別制御を適用した場合における各バッテリー残量の時間変動を示す。また、図 10 において、それぞれの手法について各バッテリー残量の総

和をとったもの、および、理論限界である単一バッテリーを用いた平準化のバッテリー残量の時間変動の比較を示す。

提案した充放電制御アルゴリズムにより、各バッテリーはなるべくバッテリー残量が均一になるように充放電が制御され、残量が最小となる時刻はほぼ一致している。そのため、図 10 に示すように、大容量のバッテリーを 1 つ用いて最適制御を行う場合と同様に、全バッテリーが蓄えていた電力を十分に放電し、全体の電力平準化に有効利用されていることが分かる。一方、個別制御の場合、各バッテリーをみると残量が 0 に近い値まで放電が行われているものの、各バッテリーが均一に利用されていないため、残量が最小となる時刻がそれぞれ異なっている。このため、図 10 に示すようにバッテリー残量の総和をとると、残量の最小値は全体最適制御と比較して低くならず、バッテリーが十分に有効活用されていないため、平準化の効果が小さくなる。

### 4.2.3 容量を変化させた場合のピーク電力の変化

図 11 と図 12 は、各バッテリーにおいて接続された電力消費負荷の総需用電力量に対するバッテリー容量の割合の変化が、提案手法と個別制御を適用した場合の負荷需用電力のピーク値に与える影響を示す。ここで、図 11 の縦軸はピーク電力と平均需用電力の比を示し、図 12 の縦軸は提案手法と個別制御のピーク電力の差を示す。また、 $[バッテリー容量]/[負荷需用電力] = 0$  のときの値は平準化制御を行わない場合のものに等しい。

バッテリー容量が非常に大きい場合、昼間に多くの電力量を放電することが可能であるが、過剰に放電すると、放電した分の電力量を夜間に充電することができない。よって、提案手法に

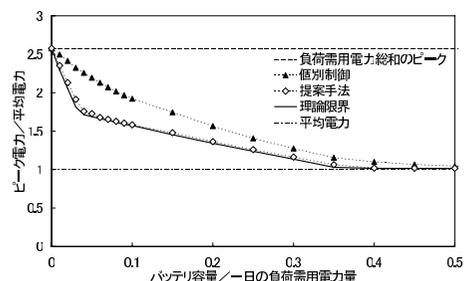


図 11 容量を変化させた場合のピーク電力の比較

Fig. 11 A comparison of peak power between proposed method and individual control method when we change the capacity of all batteries.

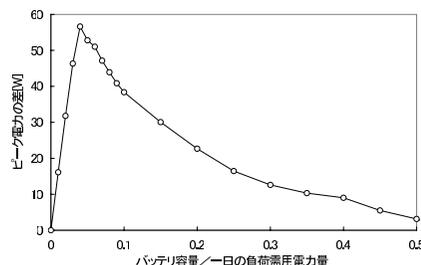


図 12 提案手法と個別制御のピーク電力の差

Fig. 12 A difference of peak power between proposed method and individual control method.

においても平均需用電力の値以下にピークを下げることができず、個別制御に近い結果となる。一方、バッテリー容量が小さい場合は、個別制御手法と比較して提案手法の方が供給電力のピーク値を下げる事が可能である。これは、各バッテリーの容量が小さくても、提案手法では全バッテリー容量を総計した大容量のバッテリーを用いた場合と同等の電力平準化が可能であるからである。このため、本手法は特にバッテリー容量が小さい場合に平準化の効果が高いといえる。

## 5. 統計分析による全体目標値の設定

### 5.1 需用電力の完全予測が不可能な場合の全体目標値の設定方法

3.4 節で述べたように、本論文で提案するアルゴリズムでは、平準化制御開始時に商用電源から各電力消費負荷やバッテリーへ供給可能な総電力量を示す全体目標値  $P$  を設定する必要がある。全体目標値の最適値の算出においては、負荷が需用する総電力の変動を完全に予測可能であれば、PSO などの探索手法を用いて決定することができ、この値に基づき最適な電力平準化が可能であることを 4 章のシミュレーション結果により示した。

しかし、一般には予測される需用電力と実測値との間には誤差が生じる。特に、全体目標値を低めに設定した場合は、各装置に設定される個別目標値  $p_n(t)$  の値が低くなり、バッテリーの放電電力量が大きくなるため、バッテリー切れが発生する可能性が高くなる。バッテリー切れになった場合、バッテリーからの放電が不可能となるため、商用電源からの総供給電力は瞬間的に大きくなり、ピークカットができなくなる。そのため、実際の運用における全体目標値の設定においては、バッテリー切れが発生しないように、ある程度高めにマージンをとった

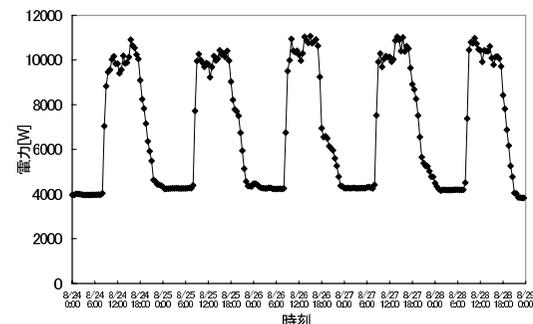


図 13 対象オフィスにおける 2009/8/24 から 2009/8/29 までの総消費電力

Fig. 13 Power consumption profile of an office from 2009/8/24 to 2009/8/29.

全体目標値を設定する必要がある。このとき、ある時点において設定しようとしている全体目標値に対して、実際に設定すべき理想的な全体目標値の方が超過しており、バッテリー切れが発生してしまう確率を定量的に評価することができれば、適切な全体目標値の設定が可能となる（本確率を以下では超過確率と呼ぶことにする）。

本章では、超過確率の評価を行うために需用電力の統計分析を行った結果を示し、超過確率に基づいた長期運用ポリシーとその実現方法について述べる。ここで、以下では [全体目標値]/[デマンド期間の時間間隔] の値を閾値電力（もしくは単に閾値）と呼ぶことにする。閾値電力を決定すれば、それに対応する全体目標値を設定することが可能である。平準化が適切に行われれば、デマンド期間のピーク電力の平均値は閾値電力以下に抑えることが可能である。

### 5.2 実測データの統計分析

統計分析を行うにあたっては、負荷需用電力の実測データの使用が望ましい。本研究では、ある典型的なオフィスにおける長期間（2008年1月から2009年11月までの約2年間分）の需用電力実測値を用いて分析を行った。本実測値は、対象オフィス内の各機器の電源につながる配電盤の電線に測定器（カレントコイル）を設置して実際に計測したものである。対象オフィスの主な電力消費源は計100台以上のノートPC、デスクトップPC、ワークステーションなどである。なお、大規模なサーバ装置や照明、空調機器は別配線になっているため、本計測値には含まれていない。計測結果の例として、図13に2009/8/24 0:00～2009/8/29 0:00までの対象オフィスにおける総消費電力の変化を示す。

3.4 節で述べたように、全体目標値の算出には全負荷の需用電力の総計値を知ることができればよい。よって、本実測データは提案したアルゴリズムによる電力平準化にも適した対

象であると考えられる。

### 5.3 理想閾値分布と確率評価

図 14 に対象オフィスにおける典型的な 1 日の総需用電力と、それに対する理想的な閾値電力 (理想閾値) を示す。理想閾値は一般に需用電力曲線に依存する。理想閾値の統計分布を知るために、2009 年における各日の理想閾値をすべて計算し (図 15)、その度数分布 (図 16) および累積分布 (図 17) を求めた。理想閾値の計算は探索手法の PSO によって行った。図 16、図 17 には、算出した閾値の平均値と標準偏差から対応する正規分布および

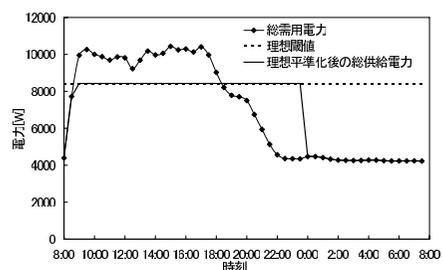


図 14 対象オフィスにおける典型的な 1 日の需用電力と、それに対する理想閾値、ならびに理想平準化後の電源供給電力

Fig. 14 A daily power consumption profile of an office, the corresponding ideal threshold level, and the system power supply after the ideal power leveling.

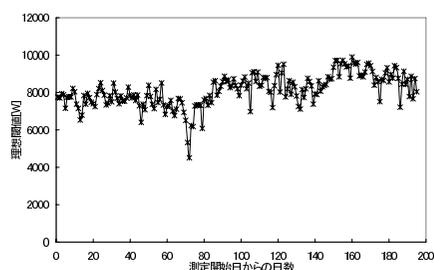


図 15 2009 年の各日の理想閾値  
Fig. 15 Ideal daily threshold levels in 2009.

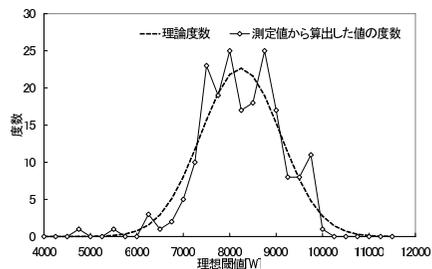


図 16 理想閾値の度数分布と対応する正規分布  
Fig. 16 A histogram of the ideal daily threshold levels in 2009 and the fit to the normal distribution.

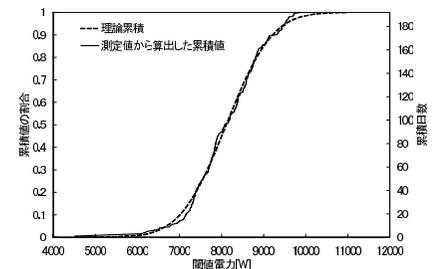


図 17 理想閾値の累積度数分布と対応する正規累積分布  
Fig. 17 A cumulative distribution of the ideal daily threshold levels in 2009 and the fit to the cumulative normal distribution.

正規累積分布を求め、閾値の計算結果と合わせて示した。これらの比較からこのオフィスの理想閾値分布は正規分布に近いことが分かる。

なお、本計算においては大容量の単一バッテリーを用いて平準化を行う場合を想定し、バッテリー容量を対象オフィスの 1 日の総消費電力量の 10% に相当する 14.5 [kWh] とした。これは、4 章のシミュレーションの際に事前に計測したノート PC の負荷需用電力の測定結果より、1 つの負荷に接続されているバッテリーの容量は、1 日の消費電力量のおよそ 10~20% であることが確認されたこと、および、対象オフィス内に接続されているノート PC の台数が 500 台程度であるとする、1 台あたりおよそ 30 [Wh] となり、一般的なノート PC 1 台分のバッテリー容量として適切な値であるという理由からこの値とした。本論文で提案したアルゴリズムは、原理的にはバッテリー容量の大きさによらずに適用することが可能であるが、4 章の図 11 で示したように、バッテリー容量が小さすぎる場合は平準化効果が少なく、大きい場合は個別制御でも最適値に近づくようになる。また、大容量バッテリーの設置はコストがかかるため、このような条件においては、本アルゴリズムの適用は不適切である。よって 10% は妥当な値であると考えられる。

理想閾値の統計分布を正規分布でモデル化できれば、その累積分布から超過確率の計算が可能となるため、対象オフィスの 2009 年の理想閾値分布について、その正規性の検証を行った。検証には Kolmogorov-Smirnov の 1 標本検定 (KS 検定)<sup>16)</sup> を用いた。KS 検定では、データから求めた標本平均と不偏分散を母数とする正規分布と実際のデータの累積分布を比較し、最大乖離  $\Delta$  を求める。正規分布の場合、 $\Delta$  の許容範囲は 2.5% 点で  $1.358/\sqrt{N}$  以下 ( $N$  はデータ数) となる。1 年分のデータ数は 195 点 (平日のみ) なので許容範囲 (2.5%) は 0.0972 以下である。本理想閾値分布を検定の結果、 $\Delta = 0.044$  と許容範囲であった。よって、理想閾値分布は正規分布とほぼ一致しているということが確認された。

理想閾値分布を正規分布でモデル化し、超過確率を求めた結果を図 18 に示す。本グラフは 1 年のうち 1 日、3 年のうち 1 日、10 年のうち 1 日だけ理想閾値が超過する確率を示す直線が記されており、これらの直線と曲線との交点から設定すべき閾値を決定することが可能である。同オフィスの今後の電力消費傾向に大きな変化がなければ、この超過確率が 2009 年以降も引き続き適用可能と考えられる。よって本手法により、過去 1 年の統計分布から算出した超過確率に基づいて全体目標値を設定可能となる。

### 5.4 長期運用方法

#### 5.4.1 超過確率に基づいた閾値電力設定

需用電力曲線は日々変化するため、それとともなって理想閾値も変化する。よって実際に

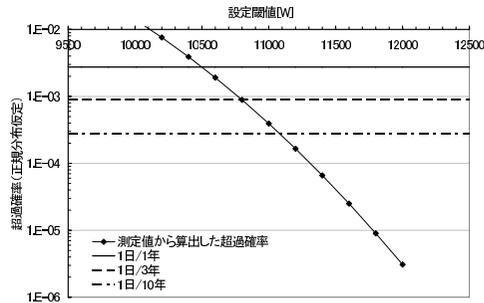


図 18 理想閾値分布を正規分布でモデル化して計算された超過確率

Fig. 18 Excess probabilities estimated using the distribution model for the ideal daily threshold levels based on the normal distribution.

は、デマンド期間における理想閾値分布にも変動が生じ、超過確率も変化することがありうる。超過確率を一定に保つという運用ポリシーに基づいて電力平準化を行う場合、閾値電力も需用電力曲線の変化に追従させていく必要がある。長期にわたる閾値電力設定方法として以下が考えられる。

ある日付  $d$  の前日から過去 1 年分の理想閾値の分布を計算し、その平均を  $\mu(d)$ 、標準偏差を  $\sigma(d)$  とする。先に述べたように、この分布はほぼ正規分布と一致するため、図 18 の方法で超過確率が「 $m$  年のうち 1 日」となるような閾値が求められ、これを  $V_m(d)$  と定義する。たとえば  $m = 10$  のとき、 $V_{10}(d) \approx \mu(d) + 3.4\sigma(d)$  となる。

実際に対象オフィスにおける 2008 年からの過去 2 年分のデータを用いて、2009 年の  $\mu(d)$  と  $V_{10}(d)$  を計算した結果を図 19 に示す。このとき閾値電力は日付  $d$  の直近 1 年分の理想閾値分布から算出された値に日々更新され、超過確率はつねに一定に保たれる。

#### 5.4.2 トレンド成分を考慮した閾値電力設定

理想閾値の変化に明確な長期的変化の傾向（トレンド）が存在する場合には、トレンド成分を分離して評価することが可能である（図 20）。このとき、まず日付  $d$  の前日から過去 1 年分のトレンド成分  $E_{tr}(d)$  を抽出する。トレンド成分は線形近似などにより求めることが可能である。そして理想閾値と  $E_{tr}(d)$  の差分の分布を計算すればよい。差分分布（平均  $\mu'(d)$ 、標準偏差  $\sigma'(d)$ ）も同様に正規分布と一致するため、前述の方法と同様に超過確率が「 $m$  年のうち 1 日」となる差分値  $V'_m(d)$  を求めることができる。よって  $V'_m(d) + E_{tr}(d)$  を設定すべき閾値電力とすれば、トレンド成分を考慮に入れつつも超過確率を一定に保つことが可能になる。

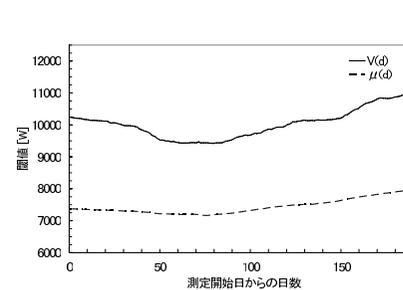


図 19 日付  $d$  の前日から過去 1 年分の理想閾値から計算された  $\mu(d)$  および  $V_{10}(d)$

Fig. 19  $\mu(d)$  and  $V_{10}(d)$  calculated from the ideal daily threshold levels for a year before the day  $d$ .

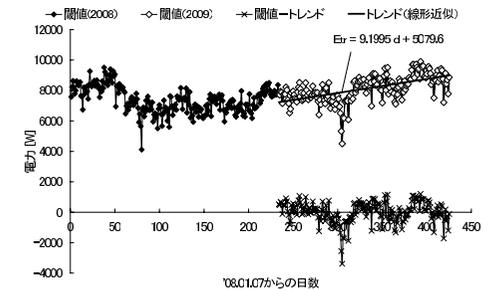


図 20 理想閾値における線形トレンド成分  $E_{tr}(d)$  と理想閾値と  $E_{tr}(d)$  の差分

Fig. 20 Linear trend components of the ideal daily threshold levels  $E_{tr}(d)$  and the deviation of the levels from the trend.

ここで、図 19、図 20 における 2009 年の測定最終日 ( $d = d_1$ ) の閾値電力 ( $m = 10$ ) を比較する。5.4.1 項で述べた手法による過去 1 年の理想閾値分布から計算される  $V_{10}(d_1)$  は 10,930 [W] であった。このとき  $\mu(d_1) = 7,990$  [W]、 $\sigma(d_1) = 860$  [W] である。一方、トレンド成分を考慮に入れて最終日の閾値電力  $V'_{10}(d_1) + E_{tr}(d_1)$  を試算すると、それよりもわずかに高い 11,060 [W] が得られた。ただし、この値はトレンド成分を線形近似して求めたもので、 $\mu'(d_1) = 0$  [W]、 $\sigma'(d_1) = 610$  [W]、 $E_{tr}(d_1) = 8,990$  [W] である。計算結果より、トレンド成分の値  $E_{tr}(d_1)$  は 2009 年の平均値  $\mu(d_1)$  よりも 1,000 [W] 高くなっていることが分かる。一方で、その増加傾向による広がり差が差し引かれたために、分布の幅は狭くなっている。よって閾値電力としては、それらがある程度打ち消しあい、結果としてわずかに高い値が得られたといえる。

トレンドがたとえば業務増加傾向などの何らかの理由に裏打ちされたものであれば、後者の閾値電力の方がその傾向を取り入れた、より確からしい値と考えられる。このように、理想閾値に長期的な変化が存在する場合においても、トレンド成分を分離することにより、その変化に追従して閾値電力を決定することが可能となる。

## 6. ま と め

本研究では、ノート PC のバッテリーのような、小容量のバッテリーが配電網に分散配置されている環境において、負荷およびバッテリーに対する商用電源からの給電の ON/OFF を切り替えるスイッチを設置して、それを制御サーバがネットワークを通じて遠隔操作可能なス

テムを考案した。また、本論文では、本システムにおいて最適な電力平準化を実現するために、制御サーバが各スイッチの ON/OFF を切り替えるタイミングを決定するアルゴリズムを提案した。そして、計算機シミュレーションを用いて評価を行い、本手法で各バッテリーの容量の総和と等しい大容量のバッテリー単体を用いた場合と同等の、理想的な平準化効果が得られることを示した。特に、本手法はバッテリーの容量が小さい場合に個別制御よりも供給電力のピークを抑えることが可能で、平準化の効果が高いことを示した。

以上の結果より、本手法を用いることで、バッテリー間で直接的な電力の交換を行うための設備を設置したり、逆流流を行ったりしなくても適用が可能であり、小容量のバッテリーを分散配置することにより、全体最適平準化を実現することが分かる。そのため、本手法により、負荷需用の増減に合わせてバッテリーを簡単に増設や除去できる、スケーラビリティの高い電力平準化システムを構築することが可能である。

すなわち、本手法により、既存の電力設備を大きく改修することなく、既存のノート PC などのバッテリーを利用して理想的かつ実用的な平準化制御が可能であることを示した。

また、本アルゴリズムの適用においては、システムへの総供給可能電力量を示す全体目標値をあらかじめ決定する必要がある。そこで、本論文では、過去の負荷需用電力の情報から統計分析を利用することにより、バッテリー切れを発生させないように適切なマージンをとった全体目標値の設定方法を示した。また、負荷需用電力に長期的な変動がある場合でも、そのトレンド成分を考慮して変動に対応させることにより、全体目標値の設定が可能であることを示した。

今後は、本論文のシステムを実際のノート PC や UPS などの機器を用いて構築し、提案アルゴリズムを適用して電力平準化を行った場合の実用性の検証を行う予定である。

## 参 考 文 献

- 1) Farhangi, H.: The path of the smart grid, *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol.8, No.1, pp.18–28 (2010).
- 2) Jung, D.Y., Ji, Y.H., Lee, S.W., Won, C.Y., Jung, Y.C. and Seo, K.D.: Grid-connected peak-load compensation system based on lithium-polymer battery, *Proc. Telecommunications Energy Conference*, pp.1–4 (2009).
- 3) 小柳文子, 瓜生芳久: 負荷平準化を目的とする電気自動車の充放電制御方策, 電気学会論文誌 B, Vol.118-B, No.5, pp.505–510 (1998).
- 4) 町田定之, 谷 辰夫: 太陽電池・蓄電池を利用した負荷平準化システムの導入効果, 電気学会論文誌 B, Vol.123-B, No.1, pp.37–46 (2003).
- 5) Yoshimoto, K., Nanahara, T. and Koshimizu, G.: New Control Method for Regu-

- lating State-of-Charge of a Battery in Hybrid Wind Power/Battery Energy Storage System, *Proc. Power Systems Conference and Exposition*, pp.1244–1251 (2006).
- 6) 千住智信, 菊永康朗, 徳留元樹, 上原明恵, 與那篤史, 舟橋俊久: 風力発電システムにおける風車と蓄電池の協調制御, 電気学会論文誌 B, Vol.129-B, No.5, pp.653–660 (2009).
- 7) Dupont, G. and Baltus, P.: Dimensioning and grid integration of mega battery energy storage system for system load leveling, *Proc. IEEE Bucharest Power Tech. Conference*, pp.1–6 (2009).
- 8) Hatori, M.: Peak-Shift Method for Notebook Computers – A power management approach for load leveling, *Proc. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, pp.117–121 (2004).
- 9) Wei, X., Yu-hui, Z. and Jie-lin, Z.: Energy-efficient distribution in smart grid, *Proc. International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, pp.1–6 (2009).
- 10) Chuang, A. and McGranaghan, M.: Functions of a local controller to coordinate distributed resources in a smart grid, *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp.1–6 (2008).
- 11) 森沢俊一: 電子機器における電源制御方法及び電力管理システム, 特許第 3730614 号 (2006).
- 12) Tanabe, T., Ueda, Y., Suzuki, S., Ito, T., Sasaki, N., Tanaka, T., Funabashi, T. and Yokoyama, R.: Optimized operation and stabilization of microgrids with multiple energy resources, *Proc. International Conference on Power Electronics*, pp.74–78 (2007).
- 13) 奥山賢治, 加藤丈佳, 呉 カイ, 鈴置保雄, 舟橋俊久: 分散電源の自律制御による需要地系統の負荷平準化, 電気学会論文誌 B, Vol.123-B, No.3, pp.304–314 (2003).
- 14) Jiang, X., Dawson-Haggerty, S., Dutta, P. and Culler, D.: Design and implementation of a high-fidelity AC metering network, *Proc. 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp.253–264 (2009).
- 15) Kennedy, J. and Eberhart, R.: Particle swarm optimization, *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol.4, pp.1942–1948 (1995).
- 16) 小野寺孝義, 山本嘉一郎: SPSS 事典 BASE 編, ナカニシヤ出版 (2004).

(平成 22 年 5 月 21 日受付)

(平成 22 年 11 月 5 日採録)



角田 忠信

昭和 54 年生。平成 14 年東京大学工学部電子情報工学科卒業。平成 16 年同大学大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻修士課程修了。平成 21 年同大学院博士課程修了。同年より株式会社富士通研究所に勤務。博士（情報理工学）。センサネットワーク技術，アドホックネットワーク技術，電力制御技術の研究に従事。電子情報通信学会会員。



大島 弘敬

昭和 49 年生。平成 8 年東京大学工学部物理工学科卒業。平成 10 年同大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士課程修了。平成 13 年同大学院博士課程修了。同年より株式会社富士通研究所に勤務。博士（工学）。平成 16 年度日本応用磁気学会優秀講演賞。磁気記録技術，電力制御・センサ技術の研究に従事。日本物理学会，日本磁気学会各会員。



山本 寛

昭和 55 年生。平成 15 年九州工業大学大学院情報工学研究科情報システム専攻博士前期課程修了。平成 18 年同大学院博士後期課程修了。同年株式会社富士通研究所入社。平成 22 年より長岡技術科学大学電気系助教。博士（情報工学）。センサネットワーク技術，オーバレイネットワーク技術，グリッドコンピューティング技術の研究に従事。電子情報通信学会，

IEEE 各会員。



原 政博（正会員）

昭和 46 年生。平成 8 年東京大学大学院理学系研究科情報科学専攻修士課程修了。現在，株式会社富士通研究所に勤務。データマイニング等のデータ分析技術の研究に従事。



藤野 信次（正会員）

昭和 35 年生。昭和 61 年大阪府立大学大学院工学研究科電子工学専攻博士前期課程修了。同年株式会社富士通研究所入社。博士（情報学）。平成 15 年情報処理学会業績賞受賞。移動無線システム，無線用 TCP/IP，異種網統合，エージェント応用等の研究開発に従事。