

家庭用UPSを用いた家庭内電力情報の保護手法の設計と実装

KAWAZOE, Toshifumi / 川添, 俊史

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院情報科学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 情報科学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 情報科学研究科編

(巻 / Volume)

8

(開始ページ / Start Page)

155

(終了ページ / End Page)

160

(発行年 / Year)

2013-03

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00009858>

家庭用 UPS を用いた家庭内電力情報の保護手法の設計と実装

Design and Implementation of an Simple Information Hiding Method for Home Appliances

川添 俊史

Toshifumi Kawazoe

法政大学大学院情報科学研究科情報科学専攻

E-mail:toshifumi.kawazoe.7b@stu.hosei.ac.jp

Abstract

Today, the smart grid has been promoted globally. The smart meter always monitors the power consumption of each home to achieve precise control of the power generation and reduction of the unnecessary power usage. Full-time monitoring leads the risk to disclose users daily activities derived from the gathered data. In the previous work, a home power rechargeable battery is introduced to conceal the activity of each appliance. However, the battery requires special function to mixture arbitrary amount of the charged power to the power from line. The proposed algorithm did not manage the amount of the charged power, then concealment does not work when the lack or fill of the battery occur.

In this paper, we propose a power activity concealment system using UPS and smart tap which camouflage the power consumption as a square waveform, random waveform, and mixture of them. The battery charged status is used to control the camouflage to keep the control well. We achieved 0.33 points improvement on the coefficient of determination on concealment.

1. はじめに

スマートグリッドは、ネットワークに接続された発電所や送電網、家庭や工場などを電力技術とIT技術を用いて、電力を効率よく供給する次世代送電網である。スマートグリッド環境下では電力消費量のリアルタイムな監視のためにスマートメータが用いられる。これにより、発電所側では需要に応じて無駄な発電を削減することが可能となり、受給者にとっては電力消費量のモニタリングにより電力消費に対する意識を喚起し、無駄な電力消費を削減する効果が期待できる。

しかし電力消費量のリアルタイムな監視は受給者の生活状況が推定できてしまう危険性がある。これに対して蓄電池や特殊な電力分配機器を用いて電力情報の保護を行う手法が提案されている。そこでは任意の量の電力を任意の量の電力を蓄電池から供給するような機器が必要であり、大がかりな設備改修が必要になる[1]。このような蓄電池を用いた消費電力隠蔽においては、蓄電容量の

管理が重要になる。

家電の電力消費動向を隠蔽するかによって変わってくるが、例えば蓄電池から利用家電に対して電力供給を行い家電の隠蔽を図るならば、電力供給を行う瞬間に十分な蓄電量がなければならない。しかし、従来研究では消費電力の隠蔽制御のさいに蓄電量が考慮されておらず、隠蔽が十分でないケースも見られる。

本研究では、無停電電源装置(UPS)を二次電池として用い、それをスマートタップで制御することで、安価で導入が容易な電力消費隠蔽システムを提案する。これらの装置により構成する場合には可変量の電力供給は難しいため、スイッチ制御による消費電力の隠蔽を、蓄電量に応じた制御により行う手法を提案し、その効果をシミュレーションで示す。

2. 電力消費からの機器推定と隠蔽

2.1. NALM

Nonintrusive Appliance Load Monitors(NALM)では家庭内の電力消費量の推移から複数の家電の識別が可能であることを示している [2, 3]。NALM には様々な種類が存在するが、その目的は宅内の家電の状況を把握し家電による消費電力を監視することである。

[3]ではビル内にて家電の監視を行っており、時系列データとして与えられる電力データの合算値からそれぞれの時刻で稼働している家電製品の内訳や、更にとどのタイミングで家電が ON になり、また OFF になったかを推定することが可能となっている。NALM による家電の識別はあらかじめ家電毎の消費電力を既知情報として与え、時間経過に伴い変動する家電の ON/OFF による電力推移の差分から家電の識別を行っている。文献[4]では電力識別を家電が ON になったときの電力消費の差分のみで行っており、その結果 80%の電力識別結果を得られている。それに対して文献[3]においては、バックトラッキングと呼ばれる手法が導入され、識別率が 90%に向上している。このバックトラッキングとは家電が OFF になったときに発生する電力差分値から家電の識別を行い、家電の OFF を検出した時刻から検出された家電の平均持続時間だけ遡り、ON になったタイミングを見つける手法である。これにより有効電力を監視する手法において高い識別精度を確保している。

2.2. NALMによる電力識別

まず、最初に従来研究でも家電製品の稼働を隠蔽する

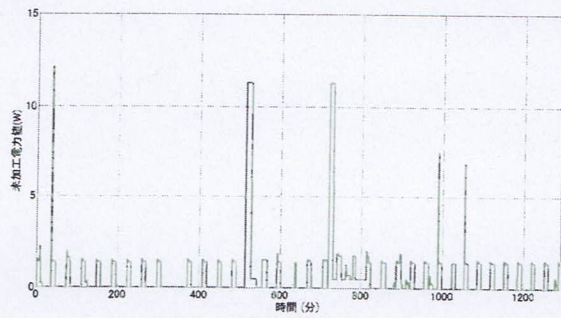


図1 識別前電力データ

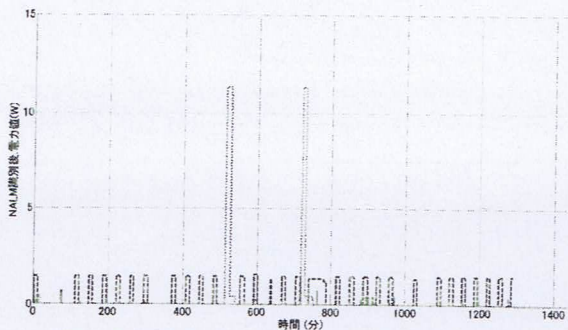


図2 再実装したNALMによる家電識別結果

対象となっている, NALMの手順を実装し, 実験環境で収集した電力消費動向に対して適用した. 以下にその結果を示す. 図1はサンプルデータであり, 図2は[3]を元に再実装したNALMによる識別結果を表している. 破線, 点線, 鎖線の波形が存在し, それぞれが冷蔵庫, ポット, プリンタに対応している. 波形が重なっている部分は複数の家電が同じタイミングで利用されていることを示している. このNALMの実装においては, 電力の微細な変動による識別精度への影響を軽減するために, 最も消費電力が小さい家電機器の消費電力以下の変動については平滑化処理を行っている. しかしパソコンのように消費電力の増減の幅が大きい場合には家電の識別精度は下がる. また例えば起動してから徐々に消費電力が増加, あるいは減少するような機器も同様に識別精度が下がる. 今回実験に用いた家電製品のなかでは, 冷蔵庫のような消費電力の変動が小さいものの識別精度が高かった. 家電の消費電力の情報をNALMに与えることで宅内にて日中の時間帯で何を使っていたかが容易に識別可能であり, 家電利用に伴う行動を推測することができる.

2.3. 蓄電池による電力消費隠蔽

従来研究[1]では再充電可能な蓄電池を用いて, 家庭内の電力消費の傾向をスマートメータ側に漏らさない手法の提案が行われている. ここで, 蓄電池から任意量の電力を供給できる装置を導入し, スマートメータと宅内の電力回路の間にこれを挟むことで, 消費傾向の見え方を制御する. この研究では, 蓄電池から一時的に放電や蓄電を行う事で消費電力の平滑化を行っている. この平滑化処理により, 各家電製品の起動時刻や停止時刻を曖昧にし, スマートメータに対して電力消費のタイミングを隠蔽している. 前述のNALMに対してこの手法を適用して

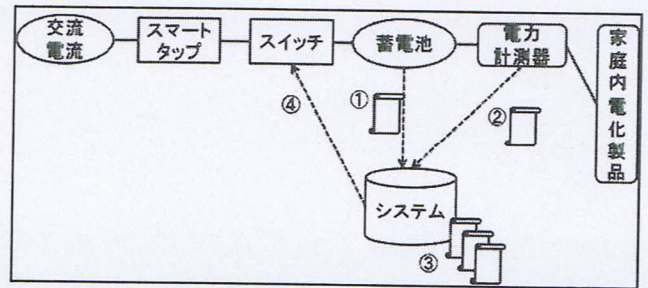


図3 システム概要

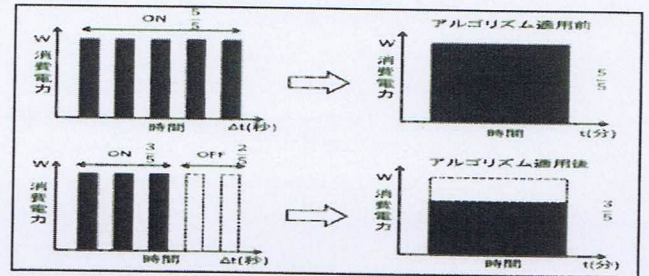


図4 消費電力制御手法

隠蔽の効果が示されている. 本研究ではスマートメータとは家庭内の消費電力を定期的に観測し, 電力会社に自動的に送信する機器を指している. またスマートタップとは家電に対する電力供給をスイッチング機能により, 閉路・開路が操作可能であるものを指しており, スマートメータに観測される電力情報の隠蔽を実現する.

3. 電力消費隠蔽手法

消費電力隠蔽のための機器構成を図3に示す. ここでは, 一般的に入手が容易な蓄電池として, 自動電源切り替え機能をもつ無停電電源(UPS)を使用することを想定している. ここで, 通常のUPSでは任意量の電源供給を行う機能を持たないため, 電力源との間でスマートタップのようなスイッチ機能を挟み, ごく短時間のスイッチングにより平均的な電源供給量の制御を行う. 図3では簡略化し単一のシステムで家庭内の全ての電源を制御するように描いているが, 実際には, 蓄電池の容量で賄うことができる機器群毎に, この消費電力隠蔽システムを接続することを想定している.

全体の動作概要は, まず蓄電池の蓄電状況や家庭内の電力消費状況を監視し, 一定周期でシステムが取得する(図3 1, 2). システムでは, 蓄電量と電力消費の傾向をもとに, 電力源から供給を受ける量(スマートタップに見せる消費量)を決め(図3 3), それに応じてスイッチの開閉時間を決定する.

3.1. 消費電力制御手法

スマートメータによる計測間隔を N とすると, 宅内でスイッチを n だけ閉路した場合, 蓄電池から家電に対して電力供給はされないためスマートメータは消費電力を観測することができる. 逆にスイッチを $N-n$ だけ開路するとスマートメータは宅内の消費電力を観測できない. そこで, N よりも小さい閉路時間を n とおき, $N-n$ だけ閉

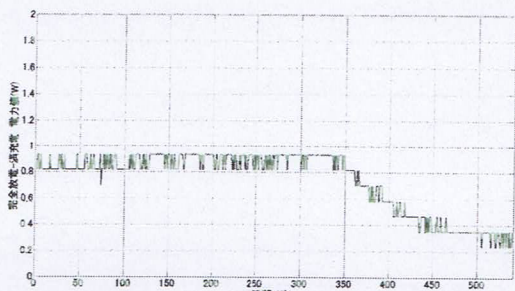


図5 UPS単体での消費電力(完全放電→満充電)

路を切り替えることで全体の消費電力を減少したように見せる。例えば図4のようにNに対して5倍の精度で開路・閉路を制御した場合、閉路時間 $n=3$ 、開路時間 $N-n=2$ に切り替えることで、スマートメータからは全体消費電力の60%まで減少したと観測される。また蓄電池自体が動作するためには電力が必要になってくるが、充電時には蓄電池自体の動作電力と充電電力の二つが宅内の電力消費に付加されて見える。動作電力についてはほぼ一定であるが充電電力は蓄電量の推移に従って変動する(図5)。NALMによる家電識別において消費電力の変動は識別率に大きく影響し、充電電力が発生しなかった場合は家電の消費電力に蓄電池の動作電力のみが上乗せされた形になる。そのため充電時には充電電力が常に発生することが好ましい。そこで蓄電池を用いて家電の隠蔽を行うためには完全放電、もしくは満充電である状態を避ける必要がある。

3.2. 電力消費隠蔽アルゴリズム

本研究ではアルゴリズム毎に蓄電量に応じて、完全放電、下限値未満、中間域(下限値以上、上限値未満)、上限値以上、満充電の5つの状態に分け処理を行う。各アルゴリズムは蓄電量によって開路・閉路をタイムスロットで切り替えるが、蓄電量が完全放電、もしくは満充電の際には同一の処理を行う。完全放電している状況では接続されている家電に対して一切の電力供給を行うことができない。そこで蓄電量が設定した下限値に至るまで閉路状態のみに限定して処理を行い、充電することで蓄電量の回復を行う。蓄電量が満充電の状況では開路のみに限定し、蓄電量が上限値に至るまで接続されている家電に対して電力供給を行い続ける。この時家電が接続されていない、あるいは接続はされているがOFFである場合であっても蓄電池自体の稼働電力を自身で補う必要があるため蓄電量を減少させることができる。

3.3. 波形による家電の隠蔽

従来研究では家電の起動時刻、停止時刻を隠蔽するために波形を平滑化している。NALMに対する電力情報の隠蔽を行う場合、最適な方法は一切の電力情報を見せないことであり、これを継続して行うことができれば家庭内の行動を推測されることはない。しかし太陽光発電のような自家発電手法を用いたとしても、電力会社に完全に依存しない状況を作ることは困難である。そのため一時的であれば一切の電力情報を見せないことは可能であるが、それを維持することは不可能であり、ある程度の

電力情報は露呈してしまう。そこで考えられたのが平滑化である。理想的な平滑化を行うことができれば電力波形に変動を発生させず、常に一定の電力消費量を保つことができる。NALMが家電を識別するためには消費電力の波形に差分が発生していなければならないため、平滑化はNALMに対して有効である。しかし理想的な平滑化を実施するためには、平滑化を実施したい期間の正確な消費電力が事前にわかっていなければならない、現実的とは言えない。そのため従来研究ではベストエフォートな平滑化を提案している。

NALMでは事前情報として家電毎の消費電力パターンを与える必要があり、与えられていない消費電力パターンについては同じ家電であったとしても識別することは不可能である。このことから消費電力パターンが同時刻に利用されている家電と同じにならないようにすれば家電の隠蔽は可能である。そのため平滑化のみではなく、例えば蓄電量に余裕がある場合には蓄電池から電力供給を行うことでも家電の隠蔽は可能であり、これによって隠蔽と蓄電量の制御を両立することができる。そこで本研究では、波形によって隠蔽の程度と蓄電量の状況は変わってくると考え、スマートメータ側にみせる電力消費変動を平滑化、矩形波、ランダム波形、混合波形となるよう制御する。パラメータは、N:サンプル周期中のスロット数、n:閉路時間、CH:蓄電電力、A:家電消費電力である。Nはスマートメータの観測間隔であり、nはスマートタップの閉路時間を示している。本研究では $N \geq n$ を常に満たすことを仮定している。CHは蓄電池が充電する際に蓄電される電力量であり、Aは蓄電池に接続された家電の消費電力を示している。これらの情報を元に、スマートメータ側にみせる電力消費変動を平滑化、矩形波、ランダム波形、混合波形となるように制御する。以下にそれぞれの制御ポリシーを述べる。

3.3.1. 平滑化

平滑化では、基本的に特定の基準値に近づくように蓄電池からの電力供給を行う。この基準値には一週間前から前日までの消費電力の平均値を用いる。

蓄電量が中間域にある場合には現在の時刻にて観測された消費電力の値が基準値以上であるか、あるいは基準値未満であるかによって蓄電池からの供給量を調節する。基準値以上であった場合は蓄電池からの供給量を多くし、基準値に最も近い値を取るようタイムスロットN中の消費電力の値を調節する。基準値未満であった場合は蓄電池からの供給量を少なくし、その代わりに閉路時間を増やす。これにより蓄電池は充電を行い、消費電力に充電電力が上乗せされる形になり消費電力を実際の値より多く見せることができる。そこでタイムスロットN中の閉路時間nの割合を増やし、消費電力が基準値に近くなるよう処理を行う。しかし留意しなければならないのは充電電力の増加幅は蓄電池の種類に依存し、満充電までに長時間を要するものであれば充電電力も小さくなる点である。即ち消費電力が基準値を上回っている場合は十分な蓄電量を用意することで解決することができるが、消費電力が少ない場合は充電電力以上に消費電力を増やすことは困難である。以下に中間域における制御式を示す。

$$CH \cdot \frac{n}{N} - A \cdot \frac{(N-n)}{N} \cong \text{基準値}$$

蓄電量が下限値を下回った場合は基準値を越える電力要求が発生し蓄電量が減少したことが推測できる。そこで電力要求が基準値を越えた時刻から現在時刻までの電力要求の平均値を求め、一時的な基準値に設定することで電力供給量の制御を行う。蓄電量が下限値から中間域に戻るまで基準値を更新し続けることで、充電と平滑化を同時に実現することができる。以下に下限における制御式を示す。

$$CH \cdot \frac{n}{N} - A \cdot \frac{(N-n)}{N} > \text{基準値}$$

蓄電量が上限値を上回った場合は基準値未満の電力要求が発生し、電力供給に余裕があったことがわかる。そこで蓄電量が下限値未満になった場合の処理と同様に、蓄電量が中間域に至るまで、電力要求が基準値未満になった時刻から現在時刻までの平均値を基準値に再設定することで蓄電量を減少させることが可能である。以下に上限における制御式を示す。

$$CH \cdot \frac{n}{N} - A \cdot \frac{(N-n)}{N} < \text{基準値}$$

3.3.2. 矩形波

矩形波では、矩形波区間と完全供給区間に分け、基本的には矩形波区間と完全供給区間の繰り返しによって波形の作成を行う。完全供給区間では閉路時間 $n=0$ にすることで実現する。

蓄電量が中間域にある場合は矩形波区間では平滑化の処理と同様に、基準値を設定し、基準値に近い値を取るよう消費電力の値を調節する。基準値は1つ前の矩形波区間において調節を行った後の消費電力から平均値を求め、これを基準値として用いる。完全供給区間では一切の消費電力が露呈しないよう蓄電池から電力供給を行う。各区間の幅は日中に作成したい波形の回数によって自由に選択することができる。

蓄電量が下限値を下回った場合矩形波区間の基準値の設定方法は蓄電量が中間域の場合と変わらないが、矩形波区間と完全供給区間の幅を変更する。蓄電量の不足を補うため、1つ前の矩形波区間における蓄電量が完全供給区間における電力供給量以上になる各区間幅を求め、波形の作成を行う。

蓄電量が上限値を上回った場合は逆に完全供給区間における電力供給量が矩形波区間にて蓄電される蓄電量以上になるよう設定する。設定によっては区間幅が極端に短い、あるいは長くなるケースが存在するため区間幅には上限と下限を設定する。

3.3.3. ランダム波形

ランダム波形では、平滑化・矩形波とは異なり、基本的に基準値を設けない。タイムスロット N 中の開路・閉路の割合を乱数により決定し、ランダム波形の作成を行う。また更にスロット数 N をランダムに変更することで値が一様になることを避けている。

蓄電量が中間域である場合は前述のように乱数を用いて波形を作成する。閉路時間 n の変動は 0 から N の値を取るよう処理を行い消費電力の隠蔽を実現する。蓄電

量が下限値を下回った場合は現在の消費電力を元に、スロット N 中の蓄電量が同タイムスロット中の電力要求の値を越える組み合わせの中から乱数を用いて選択される。そのためタイムスロット中の閉路時間は最低でも $n=1$ だけ存在し、家電の電力要求が大きく、開路時間が $N-n$ だけ存在した場合に蓄電量が減少してしまうなら閉路時間 $n=N$ を取る処理を行う。下限における n が取りえる範囲は $\frac{A \cdot N}{(CH+N)}$ から N である。

蓄電量が上限値を上回った場合はタイムスロット中の蓄電量が同タイムスロット中の電力要求未満になる組み合わせの中から乱数を用いて選択される。次の時刻における消費電力が現在の時刻にて観測されている値と同じであれば蓄電量を減らすことが可能であり、値が小さければ蓄電量が増加することもある。上限における n が取りえる範囲は 0 から $\frac{A \cdot N}{(CH+N)}$ である。

3.3.4. 混合波形

混合波形は矩形波とランダム波形を組み合わせた波形である。矩形波を作成する場合、矩形波区間と完全供給区間に分けて波形の作成を行ったが、混合波形では完全供給区間でランダム波形の作成を行っている。蓄電量に伴う処理の変化はそれぞれの波形作成手法と全く同じであり、矩形波作成区間では矩形波を、ランダム波形作成時にはランダム波形の処理を行う。

4. 実験環境

本研究では冷蔵庫、ポット、プリンタの三つの家電機器で構成された環境における電力変動を観測し、その観測値を消費電力の推移としてシミュレーションを行った。電力変動は電流計測機器であるリーエンエナジー社のはやわかりを用いて取得した。

電力計測器による計測間隔を $t=1$ 秒とし、開路・閉路間隔は t と同様と定めた。上限値を 80% 、下限値を 20% とした。シミュレーションプログラムの作成は MathWorks 社の MATLAB を用いた。シミュレーションは、全蓄電量に対して中間域であると考えて制御したもの、蓄電量に応じた制御切替を入れたものの両方について行った。図 6~21 に、各制御ポリシー毎にスマートメータ側に見える電力消費と蓄電量の推移を示す(左:電力消費、右:蓄電量)。

4.1. 評価

家電識別には再実装した NALM[3]を利用し、適合率(Precision)、再現率(Recall)による識別精度の評価、決定係数 R^2 による保護レベルの評価を行った。正解データは目視にて作成しており、全 1290 分中に冷蔵庫が 338 分、ポットが 126 分、プリンタが 76 分動作している。適合率は NALM にて識別を行い、正解か否かに関わらず識別された家電の稼働時間を示している。適合率は以下の式によって求めている。

$$\text{適合率(Precision)} = \frac{\text{NALM による識別結果中の正解の時間}}{\text{NALM によって識別された時間}}$$

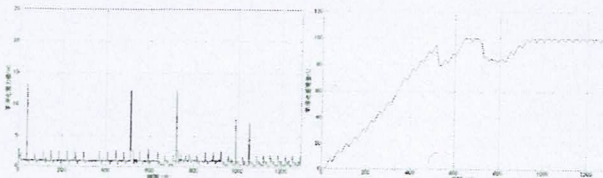


図 6 平滑化(左).

図 7 平滑化による蓄電量推移(右).

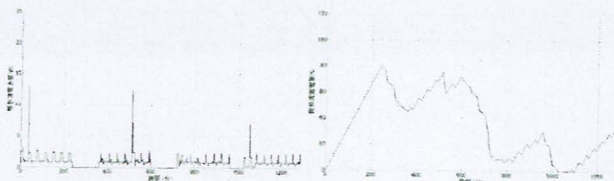


図 8 矩形波(左).

図 9 矩形波による蓄電量推移(右).

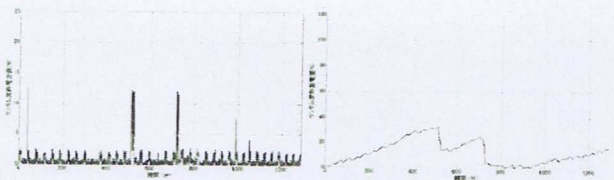


図 10 ランダム波形(左).

図 11 ランダム波形による蓄電量推移(右).

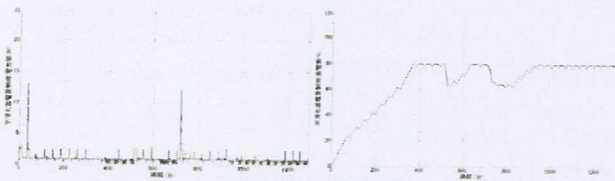


図 12 平滑化蓄電制御(左).

図 13 平滑化蓄電制御による蓄電量推移(右).

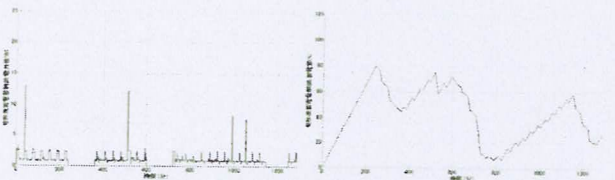


図 14 矩形波蓄電制御(左).

図 15 矩形波蓄電制御による蓄電量推移(右)

再現率は NALM による識別結果にて稼働時刻、及び消費電力が合致したものである。再現率については以下のように求めている。

$$\text{再現率(Recall)} = \frac{\text{NALM による識別結果中の正解の時間}}{\text{全正解時間}}$$

決定係数は全家電の識別結果に対して算出しており、単純線形回帰から求める。dpA をアルゴリズム適用前の時系列電力差分値とし、dp をアルゴリズム適用後の時系列電力差分値と定める。dp = $\alpha + \beta dpA + \epsilon$ とすると、dp の予測値を $\hat{dp} = \hat{\alpha} + \hat{\beta} dpA$ から求めることができる。次に偏差を SSE とすると、 $SSE = \sum_t (dp(t) - \hat{dp}(t))^2$ 、残差を SSR とし、dp の平均値を \bar{dp} とすると、 $SSE = \sum_t (\hat{dp}(t) - \bar{dp})^2$ か

表 1 NALM 適用後の適合率, 再現率, 決定係数 R^2

アルゴリズム名	家電名	Precision	Recall	R^2
アルゴリズム適用前	冷蔵庫	0.8207	0.7988	1.0000
	ポット	0.9833	0.4683	
	プリンタ	0.6222	0.3684	
平滑化	冷蔵庫	0.3390	0.4142	0.6785
	ポット	0.9787	0.3651	
	プリンタ	0.0880	0.6842	
矩形波	冷蔵庫	0.9231	0.1775	0.6434
	ポット	0.6136	0.2143	
	プリンタ	0.1000	0.6184	
ランダム波形	冷蔵庫	0.6062	0.2870	0.3430
	ポット	1.0000	0.1746	
	プリンタ	0.0351	0.3289	
平滑化(蓄電量制御)	冷蔵庫	0.9286	0.0385	0.6054
	ポット	1.0000	0.1508	
	プリンタ	0.0793	0.7500	
矩形波(蓄電量制御)	冷蔵庫	0.9286	0.1538	0.6773
	ポット	0.6136	0.2143	
	プリンタ	0.1116	0.7105	
ランダム波形(蓄電量制御)	冷蔵庫	0.6136	0.3195	0.4474
	ポット	1.0000	0.1032	
	プリンタ	0.0603	0.5263	
混合波形(蓄電量制御)	冷蔵庫	0.5289	0.3521	0.5725
	ポット	1.0000	0.1508	
	プリンタ	0.0659	0.6184	

ら求めることができる。決定係数 R^2 は以下の式から求める。

$$\text{決定係数 } R^2 = 1 - \frac{SSE}{SSR + SSE}, \quad 0 \leq R^2 \leq 1.$$

$R^2 = 1$ の場合はアルゴリズム適用後の値からアルゴリズム適用前の値が完全に説明できることを示しており、 R^2 は 0 に近づくほど保護レベルが高いことを示している。

4.2. 実験結果

実験結果を述べる(表 1)。まずアルゴリズム適用前のデータに対する NALM による識別結果は冷蔵庫では適合率が 0.8207、再現率は 0.7988 であった。ポットでは適合率は 0.9833、再現率については 0.4683 となっており、プリンタの適合率は 0.6222、再現率は 0.3684 となった。

次に平滑化を行った場合の実験結果である。冷蔵庫の適合率は 0.3390、再現率は 0.4142 となり、ポットの適合率は 0.9787、再現率は 0.3651 となった。プリンタの再現率は 0.0880、再現率は 0.6842 となっている。決定係数による評価は 0.6785 となった。

矩形波では冷蔵庫の適合率が 0.9231、再現率が 0.1775 となった。ポットの適合率は 0.6136、再現率は 0.2143 となり、プリンタの適合率は 0.1000、再現率は 0.6184 となっている。決定係数については 0.6434 となった。

ランダム波形では冷蔵庫の適合率が 0.6062、再現率が 0.2870 となった。ポットでの適合率 1.0000、再現率は 0.1746 となり、プリンタの適合率は 0.0351、再現率は 0.3289 となった。決定係数は 0.3430 となっている。

蓄電量を制御した平滑化では、冷蔵庫の適合率は 0.9286、再現率は 0.0385、ポットの適合率は 1.0000、適合率は 0.1508、プリンタの適合率は 0.0793、再現率は 0.7500 となり、決定係数は 0.6054 であった。蓄電量を制御した矩形波では冷蔵庫の適合率が 0.9286、再現率が 0.1538、ポットの適合率が 0.6136、再現率が 0.2143、プリンタの適合率が 0.1116、再現率が 0.7105 となり、決定係

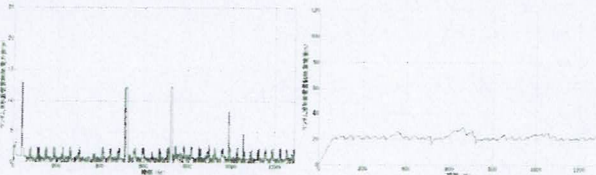


図 16 ランダム波形蓄電制御(左).

図 17 ランダム波形蓄電制御による蓄電推移(右).

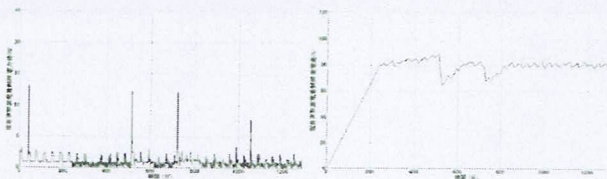


図 18 混合波形蓄電制御(左).

図 19 混合波形による蓄電推移(右).

数は 0.6773 であった。蓄電量を制御したランダム波形では冷蔵庫の適合率が 0.6136, 再現率が 0.3195, ポットの適合率が 1.0000, 再現率が 0.1032, プリンタの適合率が 0.0603, 再現率が 0.5263 となり, 決定係数は 0.4474 であった。混合波形では冷蔵庫の適合率が 0.5289, 再現率が 0.3521, ポットの適合率が 1.0000, 再現率が 0.1508, プリンタの適合率が 0.0659, 再現率が 0.6184 となり, 決定係数は 0.5725 であった。

5. 考察

適合率について見てみると最も低い値を示しているのは蓄電制御前の平滑化であった。これは冷蔵庫の適合率が最も低かったためであり, 基準値が冷蔵庫の変動幅から外れていたため識別率が低下する結果になっている。逆にアルゴリズム中最も高い適合率の結果を示しているのは蓄電制御を行った平滑化であった。蓄電量が上限を越えたときは充電による隠蔽を行っているが, 充電による変動幅は供給による変動幅よりも小さい傾向にある。そのため冷蔵庫の適合率では高い値を示し, 全体で見ると最も高い値を示している。

再現率で最も低い値を示しているのはランダム波形であり, 蓄電制御を行ったランダム波形は制御前に次いで低い値を示している。ランダム波形では特にタイムスロットによる供給量制御を頻繁に行っており, それにより本来なら利用していない家電についても誤って識別しており, 結果として家電の偽装に成功している。適合率で最も低い値を示した平滑化だが, 再現率で見ると最も高い値を示している。そのため識別された家電の中に誤った識別を行ったものが少なかったことを示している。

決定係数は平滑化, 矩形波, 蓄電制御後の平滑化・矩形波が共に高い値を示している。これらに共通している点は基準値を設けていることであり, 基準値が実測の値の平均を扱っているため波形がアルゴリズム適用前と類似したことを示している。ランダム波形, 蓄電制御後ランダム波形では基準値を設けず, タイムスロット中の電力供給量を自由に変更可能であったことがアルゴリズム適用前の波形と類似せず, 波形の予測を困難な状態にすることに成功している。

蓄電量の推移では平滑化は満充電, ランダム波形は完全放電状態が目立っている(図 6, 10)。そのため今回以上にデータセットが長くなることで適合率・再現率が悪化することが推測できる。蓄電制御を行った場合には平滑化, 混合波形が上限に達し, 蓄電制御のランダム波形では下限に達しているのが目立つが, どれも満充電状態, 完全放電状態を避けることに成功していることがわかる(図 7, 9, 11, 13, 15)。しかし上限・下限のどちらかを常に維持していることが結果から見受けられ, より細かな蓄電制御を行うことで最適な蓄電量を保ち, NALM による識別結果, 及び決定係数による評価を改善する余地があることを示している。

6. まとめ

本研究では適合率, 再現率, 決定係数による評価を行ったが, 最も優れた結果を残したのは蓄電量を制御しない状態でのランダム波形であることがわかった。また蓄電量の点も考慮した場合は蓄電量を制御したランダム波形が最も優れた結果を残しているが, 混合波形では蓄電量に余裕を持った状態であっても優れた評価結果を残すことに成功している。

文献

- [1] Georgios Kalogridis: "Privacy for Smart Meters: Towards Undetectable Appliance Load Signatures", Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on
- [2] Michael Zeifman: "Nonintrusive Appliance Load Monitoring: Review and Outlook", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 57, No. 1, February 2011, pp. 76-84
- [3] M. L. Marceau: "Nonintrusive load disaggregation computer program to estimate the energy consumption of major end uses in residential buildings", Energy Conversion & Management 41 (2000) pp. 1389-1403
- [4] Linda Farinaccio: "Using a pattern recognition approach to disaggregate the total electricity consumption in a house into the major end-uses", Energy and Buildings 30(1999), pp. 245-259