

スマートメータ自動検針システムにおいて 金銭的な公平性を考慮した2世帯住宅電力使用量秘匿化手法

稲村 茅大^{1,a)} 豊田 健太郎^{1,b)} 笹瀬 巖^{1,c)}

概要: 通信機能を活用してリアルタイムに自動検針 (AMR: Automatic Meter Reading) を行うスマートメータの普及によって、電力消費量の見える化、およびエネルギーの効率化が期待されている。一方、計測した各世帯のリアルタイムな電力使用量から顧客のライフスタイルを推定する NILM (Non Intrusive Load Monitoring) と呼ばれる手法が提案されているが、プライバシーを侵害する可能性が問題となっている。そこで従来、家庭用蓄電池を用いて家電を使用していない時に充電を行い、家電の使用時には充電した蓄電池を使用することにより NILM によるライフスタイルの推定を困難にして、プライバシー保護を行う方式 (BLH: Battery-based Load Hiding) が検討されてきた。しかしながら、従来のいずれの方式も1軒に1つの高価な家庭用蓄電池を配置したモデルを想定しており、複数世帯に1つの蓄電池を配置する方式の検討がなされていない。複数世帯に1つの蓄電池を配置方式では、蓄電池の配置コストの低減が期待されるが、同時に各世帯の電気使用料の負担の公平性を維持することが課題となる。そこで本論文では、各世帯の電気使用料の負担の公平性を考慮しつつ2世帯の使用電力量を同時に制御して電力使用量を秘匿化する手法を提案する。提案方式では、各世帯の電気使用料の負担額が実際の世帯内での電気使用料から一定額以上逸脱した場合に、差の大きな世帯が優先的に放電を行い、差の小さな世帯は優先的に充電を行うことで世帯間の電気使用料の負担の公平性を実現する。実際の電力消費量のデータセットを用いて計算機シミュレーションを行い、本方式の有効性を示す。

Power Usage Hiding Technique Considering Monetary Fairness in the Automatic Meter Reading System

CHIHIRO INAMURA^{1,a)} KENTAROH TOYODA^{1,b)} IWAO SASASE^{1,c)}

Abstract: AMR (Automatic Meter Reading) system is expected to be used for real time load monitoring to optimize power generation and energy efficiency. However, Batra, N. et al. propose a technique to estimate consumer's lifestyle from a realtime load profile and this raises an alarm to the academic and industries. In order to overcome this concern, BLH (Battery-based Load Hiding) techniques are recently proposed. In BLH, a household battery is used to obfuscate an actual load profile by charging and discharging. Although such BLH algorithms have already been studied, none of them considers the case for a two-family home. It is important to consider a two-family home case because a household battery is very expensive. In this paper, we propose a new BLH algorithm for two-family home that considers the monetary fairness. Our scheme can achieve the monetary fairness among each family by setting a threshold to control the charging and discharging time between the families. The efficiency of our scheme is demonstrated through the computer simulation with real data.

¹ 慶應義塾大学 理工学部 情報工学科
Dept. of ICS, Information and Computer Sciences, Keio University

a) inamura@sasase.ics.keio.ac.jp

b) toyoda@sasase.ics.keio.ac.jp

c) sasase@ics.keio.ac.jp

1. はじめに

無線通信機能を提供した検針計 (スマートメータ) の普及によって、リアルタイムな自動検針、電力使用量の見える化、および効率的なエネルギー供給制御の実現が期待され

ている [1-3]. その一方で, 計測した各世帯のリアルタイムな電力使用量からライフスタイルを推定する NILM(Non Intrusive Load Monitoring) 手法 [4,5] が提案されている. NILM によってリアルタイムに使用した家電の情報を取得することで, 電力会社側では顧客に対して家電単位での節電喚起が行えるようになるが, 各世帯のプライバシーの侵害が問題となっている. そのため, NILM によるライフスタイルの推定を困難にする方式が必要となる. そこで, 家庭用蓄電池を用いて家電を使用していない時に充電を行い, 家電の使用時には充電した蓄電池を使用することにより NILM によるライフスタイルの推定を困難にして, プライバシ保護を行う方式 (BLH: Battery-based Load Hiding) が検討されている [6-10]. BLH を実現する方式として最初に提案された BE (Best Effort) 方式では出力値を一定値に近付けるため, 家庭用蓄電池を用いてスマートメータによる計測電力量の制御を行い, 計測電力量の時間変化を低減することでライフスタイルの推定を困難にする. しかし, 蓄電池の充電状態を考慮していないため, 蓄電池が満充電もしくは空のため BLH が行えない状態に陥る場合が存在する [6]. そこで NILL (Non-Intrusive Load Leveling) 方式では過充電もしくは過放電が発生した場合に蓄電池を安定化させるため, 蓄電池の充電状態および放電量に閾値を設け, 閾値を超えた場合に継続的な充電期間を設けることで継続的な BLH を行うことを可能にする [7]. しかし, BE と同程度のプライバシー保護を行うためにはより大容量の蓄電池が必要となる. そこで SF(Stepping Frame) 方式では電力消費量の連続的な変化を離散化することで, BE, NILL 方式と比較して低容量の蓄電池によってライフスタイルの推定を困難にし, プライバシ保護を実現する [8]. その他の関連研究として, 環境発電を利用した BLH 方式および差分プライバシーを考慮した方式等が提案されているが, いずれの方式も 1 軒に 1 つの家庭用蓄電池を配置することを想定しており, 複数世帯に 1 つの家庭用蓄電池を配置するモデルは考慮されていない [9,10]. そこで本論文では, 同時に 2 世帯の使用電力量を制御し, 電力使用量を秘匿化する手法を提案する. 2 世帯を同時に制御する上で, 各世帯の充放電量に差異が生じると金銭的な不公平が生じるため, 実際の電気使用料と請求される電気使用料の差に閾値を設け, それを超えた場合に請求額がより大きい世帯が蓄電池を利用し請求額がより小さい世帯が蓄電池の充電を行うことで各世帯の電気使用料の負担の公平性を実現する. 提案方式では 2 世帯住宅に家庭用蓄電池を 1 つ配置するため, 各世帯に蓄電池を配置する場合と比較して設置に伴う各世帯の金銭的負担を低減可能である. 実際の電力消費量のデータセットを用いて計算機シミュレーションを行い, 提案方式の有効性を示す.

表 1 蓄電池パラメータ

変数名	定義
β	最大入出力効率
C_{max}	蓄電池容量
$r_{residual}(t)$	蓄電池の充電度合 (%)
$C(t) = r_{residual}(t) * C_{max}$	蓄電池の充電量
$C_H = 90\%$	安全な蓄電池充電度合の上限值
$C_L = 20\%$	安全な蓄電池充電度合の下限值
$t = 0, 1, 2, \dots$	時間
$d(t)$	世帯内電力使用量
$e(t) = \beta * h(t)$	スマートメータによる電力使用量の計測値
$b(t)$	蓄電池への充電量
$s(t)$	離散方向決定係数 1 で上界, 0 で下界に設定
$h(t)$	離散レベル決定係数 上界値, 下界値に影響

表 2 制約条件

条件	意味
$0 \leq e(t) \wedge b(t) = e(t) - d(t)$	計測値は正の数かつ蓄電池充電量の変化量は計測値と電力使用量の差
$-\beta_d \leq b(t) \leq \beta_c$	蓄電池の充放電量は最大効率以下
$C(t) = \sum_{i=1}^t b(i) + C(0)$	$C(0)$ は蓄電池の初期充電量
$0 \leq C(t) \leq C_{max}$	蓄電池の充電量は 0 - 100%

2. 従来方式

本章では BLH を実現する方式のうち, 低容量の蓄電池を用いてライフスタイルの推定を困難にできる SF-LS2 (Stepping Frame - Lazy Stepping 2) 方式を取り上げる. SF-LS2 方式では, ある世帯においてこれから使用しようとしている電力を秘匿するために充電を行うか放電を行うかを蓄電池の充電度合に応じて決定した上で, 出力される電力量を離散化する. これにより, 蓄電池が満充電もしくは空となる状態に陥らないように制御でき, かつ少ない容量の蓄電池により BLH を実現する. 以下に SF-LS2 方式の手順, 利点および欠点を述べる.

2.1 アルゴリズム

SF-LS2 方式ではまず世帯内での電力消費量 $d(t)$ と時刻 $t-1$ におけるスマートメータによる計測値 $e(t-1)$ の差を計算し, 次にこれから使用しようとしている電力を秘匿するために充電を行うか放電を行うかを表す $s(t)$ を決定する (Alg. 1). ここで $d(t)$ は時刻 t において使用した家電の消費量を表すのに対し, $e(t)$ は実際に電力会社に送られる電力使用量 (BLH 制御後の使用量) を表す. $s(t) = 1$ の場合, 充電により $e(t)$ を $d(t)$ よりも増大させ, $s(t) = 0$ の場合, 放電により $e(t)$ を $d(t)$ よりも低減させる. SF-LS2 方式では, 蓄電池の充電量に上限値 C_H および下限値 C_L を設け

Algorithm 1 Setting charge state $s(t)$

```

1: if  $r_{residual}(t-1) \leq C_L$  then
2:    $s(t) \leftarrow 1$  (charge)
3: else if  $r_{residual}(t-1) \geq C_H$  then
4:    $s(t) \leftarrow 0$  (discharge)
5: else if  $|d(t) - e(t-1)| > \beta$  then
6:   randomly choose  $s(t)$ 
7: else
8:    $s(t) \leftarrow s(t-1)$  (keep charge or discharge)
9: end if

```

Algorithm 2 Deciding stepping amount $h(t)$

```

1: if  $s(t) = 1$  then
2:    $h(t) \leftarrow \lceil \frac{d(t)}{\beta} \rceil$ 
3: else if  $s(t) = 0 \wedge d(t) \bmod \beta \neq 0$  then
4:    $h(t) \leftarrow \lfloor \frac{d(t)}{\beta} \rfloor$ 
5: else
6:    $h(t) \leftarrow \frac{d(t)}{\beta} - 1$ 
7: end if

```

表 3 従来方式の動作例

t	$d(t)[W]$	$s(t)$	$h(t)$	$e(t)[W]$	$r_{residual}(t)$
0	270	1	1	1000	89.1%
1	378	1	1	1000	90.15%
2	420	0	0	0	89.1%

る。蓄電池の充電量 $r_{residual}(t-1) * C_{max}$ が下限値 C_L よりも低い場合、蓄電池が空になる状態を防ぐために充電を行なう ($s(t) = 1$)。一方、充電量 $r_{residual}(t-1) * C_{max}$ が上限値 C_H よりも高い場合、蓄電池が満充電になることを防ぐために放電を行なう ($s(t) = 0$)。

次に $s(t)$ に基づいて離散レベルを計算する $h(t)$ を決定する (Alg. 2)。 $s(t) = 1$ の場合、計測される電力量を離散レベルの上界に設定するため、天井関数を用いて $h(t)$ の値を増大する。一方、 $s(t) = 0$ の場合は計測される電力量を離散レベルの下界に設定するため、床関数を用いて $h(t)$ の値を低減する。ただし、 $s(t) = 0$ かつ $d(t) \bmod \beta = 0$ の場合は上界値と下界値が一致するため、離散レベルを $h(t) \leftarrow \frac{d(t)}{\beta} - 1$ と定義する。

最後に、 $h(t)$ に基づいてスマートメータで計測される電力使用量の出力値 $e(t)$ を $e(t) = \beta * h(t)$ として算出する。これにより $e(t)$ を離散レベルの上界値もしくは下界値に設定することができる。

2.2 従来方式の動作例

ここで従来方式の動作例を示す。表 3 に、ある世帯における実際に家電が消費した電力量 $d(t)$ に対して本方式を適用した場合の各パラメータの推移を示す。ここでは $\beta = 1000 [W]$ とし、 $C_{max} = 1[kWh]$ とする。まず、 Alg. 1 に基づいて $t = 1$ における蓄電池の充電度合 $r_{residual}(0)$ を計算すると $r_{residual}(0) = 89.1%$ となり過充電もしくは過放

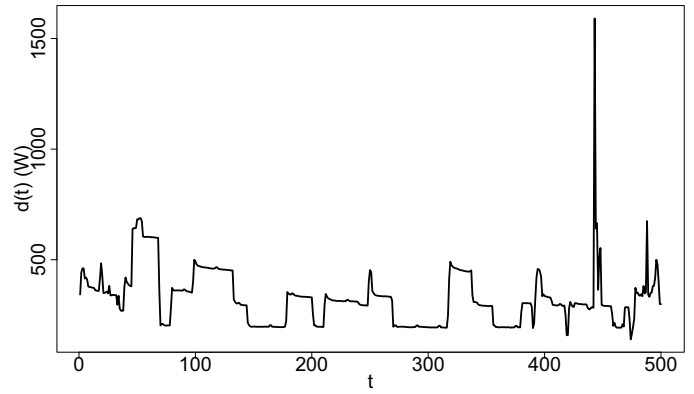


図 1 世帯内電力使用量 $d(t)$

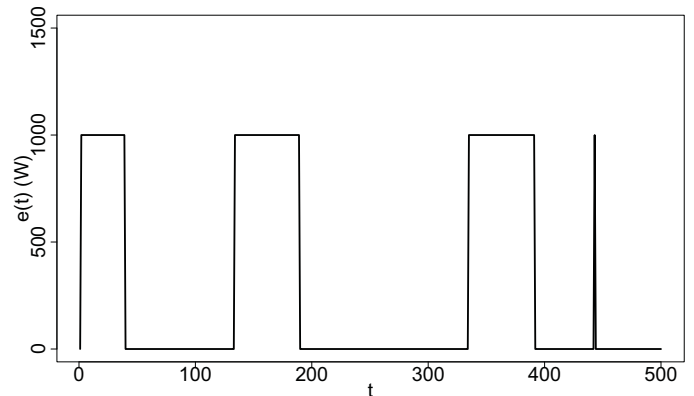


図 2 SF-LS2 方式による電力制御後の計測電力量 $e(t)$

電のいずれでもないため、 $|d(1) - e(0)|$ を計算する。ここで $|d(1) - e(0)| = 622 < \beta$ となるため、 $s(1) \leftarrow s(0)$ によって充電 ($s(1) = 1$) が行われる。次に Alg. 2 に基づいて $h(1)$ の計算をすると $s(1) = 1$ により $h(1) = \lceil 0.27 \rceil = 1$ となる。最後に Alg. 3 に基づいて $e(1)$ を計算すると $e(1) = 1 * 1000 = 1000$ となり、上界値に達していることがわかる。次に $t = 2$ の場合を考える。蓄電池の充電度合 $r_{residual}(1) = 90.15\% > C_H$ により過充電のため、 $s(2) = 0$ となる。後の計算は $t = 1$ の場合と同様である。図 1 および図 2 に上述の動作を $t = 500$ まで繰り返した場合の $d(t)$ および $e(t)$ を示す。表 3 および図 2 からわかるように、各時刻 t において電力会社が観測する消費電力量 $e(t)$ は離散化されており、BLH を実現できることがわかる。

2.3 従来方式の問題点

以上のように、SF-LS2 方式は各世帯のプライバシー保護を実現可能であるが、1 軒に 1 つの家庭用蓄電池を配置することを想定しており、複数世帯に 1 つの家庭用蓄電池を配置するモデルは考慮されていない。家庭用蓄電池は 1 台百万円程度 [11–13] と非常に高価であり、各世帯に配置することを想定した場合、金銭的負担が非常に大きいことが問題となる。そこで、1 つの蓄電池を用いて複数世帯の BLH

表 4 提案方式パラメータ

変数名	定義
$Pr_i(t)$	世帯 i の電気使用料 [円 / kWh]
$LP_i(t)$	世帯 i の電気料金差
LP_{th}	電気料金差閾値
$d_i(t)$	世帯 i の電力使用量
$e_{i,c}(t)$	充電想定時 ($s(t) = 1$) の出力値
$e_{i,d}(t)$	放電想定時 ($s(t) = 0$) の出力値
<i>Stabilization</i>	蓄電池安定化モード
<i>Fairness</i>	公平性モード
<i>Normal</i>	通常モード

を実現する方式が必要である。

3. 提案方式

そこで本論文では、SF-LS2 方式の複数世帯への適用として、同時に 2 世帯の使用電力量を制御し、電力使用量を秘匿化する手法を提案する。2 世帯を同時に制御する上で、各世帯の充放電量に差異が生じると金銭的な不公平が生じる。そこで実際の電気使用料と請求される電気使用料の差に閾値を設け、それを超えた場合に請求額がより大きい世帯が蓄電池を利用し請求額がより小さい世帯が蓄電池の充電を行うことで各世帯の電気使用料の負担の公平性を実現する。

3.1 2 世帯住宅を想定する制約条件

2 世帯住宅に家庭用蓄電池を 1 つ配置する方式を採用した場合、設置に伴う各世帯の金銭的負担を低減可能であるが、各世帯の電気使用料の負担の公平性を維持することが課題となる。ここで電気使用料の負担の公平性とは、充電に伴う電気料金と実際に蓄電池を使用することにより得られる電気料金の差 $LP_i(t)$ が一定額に収まることを表す。

3.2 アルゴリズム

表 4 に提案方式で用いるパラメータを示す。提案方式では各時刻 t において直前の蓄電池の残量度合 $r_{residual}(t-1)$ と各世帯間の充放電に伴う料金差に応じて 3 つのモードを切り替えて BLH を行う (Alg. 3)。

3.2.1 モードの選択

提案方式では蓄電池が満充電もしくは空状態になり BLH を行うことができない状態に陥ることを防止するため、まず蓄電池の残量度合 $r_{residual}(t-1)$ を確認し、過充電もしくは過放電状態の場合は充電量制御を優先し、蓄電池安定化モードで制御を行う (Alg. 4)。過充電もしくは過放電状態でない場合、各世帯の差 $LP_i(t-1)$ と閾値 LP_{th} の比較を行い、差が閾値を超えた場合は公平性モードで制御を行い (Alg. 5)、閾値を超えてない場合は通常モードでの制御を行う (Alg. 6)。

Algorithm 3 Deciding mode

```

1: check state  $r_{residual}(t-1)$ 
2: if  $r_{residual}(t-1) \leq 20\% \vee r_{residual}(t-1) \geq 90\%$  then
3:   mode  $\leftarrow$  Stabilization
4: else if  $\max(LP_1(t), LP_2(t)) \geq LP_{th}$  then
5:   mode  $\leftarrow$  Fairness
6: else
7:   mode  $\leftarrow$  Normal
8: end if

```

Algorithm 4 Stabilization mode

```

1: if  $r_{residual}(t-1) \leq 20\%$  then
2:    $s_i(t) \leftarrow 1$ 
3: else if  $r_{residual}(t-1) \geq 90\%$  then
4:    $s_i(t) \leftarrow 0$ 
5: end if
6:  $\beta \leftarrow \frac{\beta}{2}$ 
7: Calculate  $h_i(t)$ ,  $e_i(t)$ , and  $C(t)$  similarly to the SF-LS2

```

3.2.2 蓄電池安定化モード

過充電の場合は両世帯放電を行い ($s(t) = 0$)、過放電の場合は両世帯とも充電を行う ($s(t) = 1$)。この際、各世帯の最大入出力効率を半分にすることで公平に充放電制御を行う。

3.2.3 公平性モード

公平性モードでは各世帯の差 $LP_i(t-1)$ を比較し、より蓄電池を使用している (得をしている) 世帯が充電を行い ($s(t) = 1$)、蓄電池を使用していない (損をしている) 世帯が放電を行う ($s(t) = 0$)。各世帯の離散レベルを計算する $h(t)$ とスマートメータで計測される電力使用量の出力値 $e(t)$ は、従来方式と同様の式を用いて計算を行う。得をしている世帯が充電を行い、損をしている世帯が放電を行うことで差 $LP_i(t)$ の是正を行うことができる。

3.2.4 通常モード

通常モードではまず、 $s(t) = 0, 1$ それぞれの場合についての各世帯の出力値 $e_{i,d}(t)$, $e_{i,c}(t)$ を計算する。次に残量度合 $r_{residual}(t-1)$ が過充電 (90%) と過放電 (20%) の平均である 55% 以上の場合は放電処理を優先的にを行い、55% 未満の場合は充電処理を行う。充電残量割合が 55% 以上の場合は各世帯の放電処理理想定時の蓄電池の放電量 $|d_i(t) - e_{i,d}(t)|$ がより大きな世帯に放電させ、蓄電池が放電可能な場合は放電を行い、そうでない場合は充電処理を行う。充電残量が 55% 未満の場合は各世帯の充電処理理想定時の蓄電池の充電量 $|d_i(t) - e_{i,c}(t)|$ がより大きな世帯に充電させ、蓄電池が充電可能な場合は充電を行い、そうでない場合は放電処理を行う。通常モードでは充電度合 $r_{residual}(t)$ が 55% 付近で推移するように制御を行うことで、過充電もしくは過放電状態に陥る頻度を低減する。

3.3 提案方式の動作例

例を用いて提案方式の動作を説明する。表 5 に公平性

Algorithm 5 Fairness mode

```

1: check  $LP_i(t-1)$ 
2: if  $LP_1(t-1) \geq LP_2(t-1)$  then
3:    $s_1(t) \leftarrow 1$ 
4:    $s_2(t) \leftarrow 0$ 
5: else
6:    $s_1(t) \leftarrow 0$ 
7:    $s_2(t) \leftarrow 1$ 
8: end if
9: calculate  $h_i(t)$ ,  $e_i(t)$ , and  $C(t)$  similarly to the SF-LS2

```

Algorithm 6 Normal mode

```

1: Function  $F_{i,j,k}(t)$ 
2:  $i \in [1, 2]$  and  $(j, k) \in [c, d]$  (Charge, Discharge)
3: if  $r_{residual}(t-1) \geq 55\%$  then
4:    $[j, k] \leftarrow [d, c]$ 
5: else
6:    $[j, k] \leftarrow [c, d]$ 
7: end if
8:  $\max(|d_i(t) - e_{i,j}(t)|) \rightarrow \text{output } e_{i,j}(t)$ 
9: if  $|\min(d_i(t) - e_{i,j}(t))| \leq \beta - \max(|d_i(t) - e_{i,j}(t)|)$  then
10:  output  $e_{i,j}(t)$ 
11: else
12:  output  $e_{i,k}(t)$ 
13: end if
14: EndFunction
15:
16: Calculate  $e_{i,c}(t)$  and  $e_{i,d}(t)$ 
17: Calculate  $|d_i(t) - e_{i,c}(t)|$  and  $|d_i(t) - e_{i,d}(t)|$ 
18: Check  $r_{residual}(t-1) * C_{max}$ 
19: Calculate  $F_{i,j,k}(t)$ 
20: Calculate  $C(t)$ 

```

および通常モードの動作例を示す。ここで、充放電効率 $\beta = 1000$, 閾値 $LP_{th} = 100$ とする。

$t = 1$ では残量度合 $r_{residual}(0) = 53\%$ のため、充電処理が優先される。ここで各世帯が充電を行うと仮定した場合の充電量 $|d_i(1) - e_{i,c}(1)|$ を計算すると世帯 1 において 800, 世帯 2 において 100 となる。したがって、世帯 1 の放電量はより大きいため、世帯 1 の放電処理が優先される。世帯 2 は $100 \leq \beta - |d_2(1) - e_{2,c}(t)|$ が成立するため、放電処理を行う。

$t = 2$ では残量度合 $r_{residual}(1) = 55\%$ のため、放電処理が優先される。同様に各世帯が放電を行うと仮定した場合の放電量 $|d_i(1) - e_{i,d}(1)|$ を計算すると世帯 1 において 400, 世帯 2 において 800 となる。したがって、世帯 2 の放電量がより大きいため、世帯 2 の放電処理が優先される。世帯 1 は $400 \geq \beta - |d_2(t) - e_{2,d}(t)|$ となるため、充電処理が行われる。

$t = 3$ では世帯 1 の差 $LP_1(2)$ が 100 以上となるため、公平性モードでの動作となる。したがって充電に伴う金銭的負担のより大きい世帯 1 が蓄電池を利用し、世帯 2 が充電を行う。

提案方式では差 $LP_i(t)$ に基いて制御を切り替えることで

表 5 提案方式動作例

t	$d_1(t)$	$d_2(t)$	$s_1(t)$	$s_2(t)$	$e_1(t)$	$e_2(t)$	$r_{residual}(t)$	$LP_1(t)$	$LP_2(t)$
0	-	-	-	-	-	-	52%	95	20
1	2200	2900	1	1	3000	3000	55%	99	21
2	2400	2800	1	0	3000	2000	54%	102	17
3	3400	2300	0	1	3000	3000	55%	100	21

表 6 シミュレーション諸元

変数名	定義
使用データセット	Wiki-Energy Dataset [14]
比較対象	SF-LS2
評価項目	最大料金差, 相互情報量
世帯数	100 世帯
同時制御世帯数	2 世帯
測定間隔	1 分
測定期間	30 日間 (2014 年 4 月)
蓄電池容量 C_{max}	1.0[kWh]
充放電効率 β	1.0[kW]
世帯 1 料金制度	従量電灯 B [15]
世帯 2 料金制度	夜得プラン [15]
料金差閾値 LP_{th}	1, 5, 10, 25, 50, 100, 200, ∞ (円)

各世帯において蓄電池の充放電に伴う電気使用料の負担の公平性を実現する。また、2 世帯住宅に家庭用蓄電池を 1 つ配置するため、各世帯に蓄電池を配置する場合と比較して設置に伴う各世帯の金銭的負担を低減可能である。

4. 特性評価

提案方式の有効性を示すため、計算機シミュレーションを用いて評価を行う。まず、提案方式の閾値 LP_{th} に対する最大料金差の評価を行い、次に従来方式 SF-LS2 との相互情報量の比較を閾値 LP_{th} 別に行う。表 6 にシミュレーション諸元を示す。シミュレーションでは 100 世帯の電気使用量データを用いる [14]。電気使用量データは測定間隔 1 分のもので 30 日分のデータを使用する。蓄電池容量 C_{max} は一般家庭に設置することを想定し、1.0kWh とし、充放電効率 β は 1.0kW とする。この場合、1 時間で蓄電池を空から満充電もしくは満充電から空にすることができる。提案方式ではその内 2 世帯のデータを使用する。本論文では 2 世帯の料金体系が異なる場合も提案方式が有効であることを示すため、1 世帯は料金制度を従量電灯 B 制を適用するのに対し、他方は料金制度を夜得プラン制として蓄電池による BLH を行う。ここで従量電灯 B 制とは、東京電力で用いられている最も契約世帯数の多い一般家庭向け従量制プランを表し、電気使用料は一律 25.91[円 / kWh] である。一方、夜得プラン制は 21 時から翌朝 5 時までの電気使用料が 12.48[円 / kWh]、それ以外の時間帯では 37[円 / kWh] である。料金差閾値 LP_{th} は設定した閾値に対する相互情報量を比較するため、1, 5, 10, 25, 50, 100, 200 円と閾値を設けない場合の 8 通りとする。

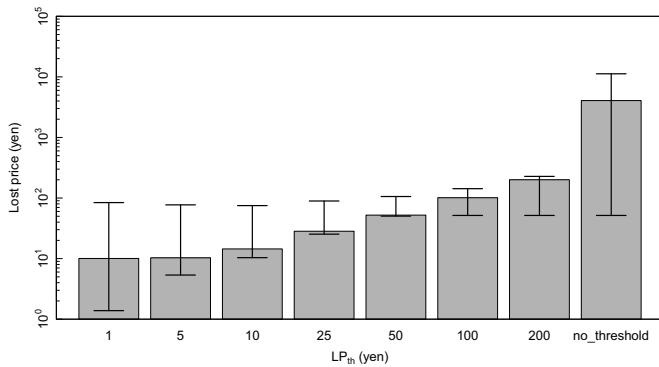


図 3 LP_{th} に対する平均最大料金差

表 7 各方式における蓄電池安定化モードでの制御割合 (平均)

方式	蓄電池安定化モードでの制御割合
SF-LS2	2.10%
LP _{th} = 1	7.74%
LP _{th} = 5	3.67%
LP _{th} = 10	2.42%
LP _{th} = 25	1.39%
LP _{th} = 50	0.72%
LP _{th} = 100	0.27%
LP _{th} = 200	0.08%

4.1 閾値 LP_{th} に対する最大料金差

図 3 に閾値 LP_{th} に対する最大料金差を示す。ここでは、棒グラフが平均最大料金差を示し、線グラフがその上限および下限の変動範囲を示す。図 3 において、使用したデータセットより 2 世帯の電気使用量を抽出するという操作を全ての組み合わせで行うことで評価を行った。図 3 において閾値 LP_{th} を設けない場合、世帯の組み合わせによって最大料金差は大きく変動し、最悪の場合 11245 円の差が生じる。一方、閾値 LP_{th} = 25 以上を設けた場合は最大料金差の変動をほぼ設定した閾値 LP_{th} 以内に収めることができることがわかる。これは閾値 LP_{th} に基づき公平性モードでの制御を行う際、得をしている世帯が充電を行い、損をしている世帯が放電を行うことで差 LP_i(t) を是正しているためである。しかし、閾値 LP_{th} = 1, 5, 10 に対する最大料金差の結果からわかる通り、いずれの閾値を設定したとしても 10 円程度の料金差が生じる。これは閾値 LP_{th} を小さくするほど蓄電池安定化モードによる制御割合が増大するためである。

4.2 蓄電池安定化モードに伴う差 LP_i(t)

表 7 に閾値 LP_{th} に対する蓄電池安定化モードでの制御割合の平均を示す。表 7 より提案方式における閾値 LP_{th} = 1, 5, 10 の場合、従来方式 SF-LS2 と比較して蓄電池安定化モードでの制御割合が高いことがわかる。これは蓄電池安定化モードの場合は差 LP_i(t) に基づいた制御を行う

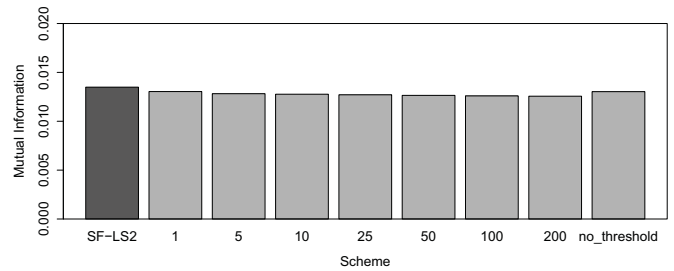


図 4 LP_{th} に対する平均相互情報量

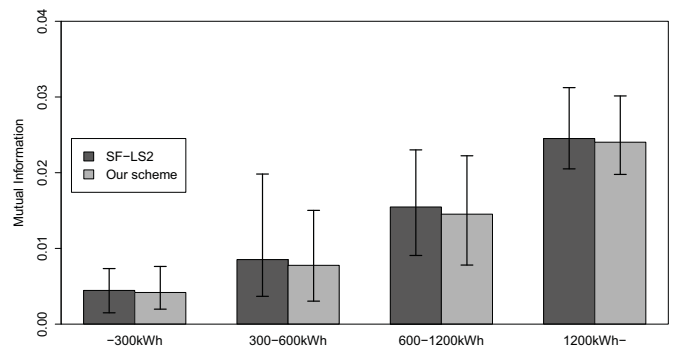


図 5 電力使用量の異なる世帯に対して提案方式を適用した場合の平均相互情報量 (LP_{th} = 25)

ことができないため、実際の閾値に対して差 LP_i(t) が増大するためである。一方、閾値 LP_{th} = 25 以上の場合、従来方式 SF-LS2 と比較して蓄電池安定化モードでの制御割合が低減する。このことから、最大料金差の変動を低減するには閾値 LP_{th} 以内に収めるためには蓄電池安定化モードでの制御割合の低減が必要となることがわかる。

4.3 各方式における相互情報量

図 4 に LP_{th} に対する平均相互情報量を示す。ここで、平均相互情報量とは実際に電力会社に送られる電力使用量 e(t) と世帯内での電力消費量 d(t) の相互依存の尺度を示す。平均相互情報量の値が 0 に近いほど、e(t) から d(t) を推定することは困難となる。図 4 より、料金差閾値 LP_{th} に拘らず従来方式 SF-LS2 と同程度の平均相互情報量を得られることがわかる。このことから、提案方式によって最大料金差を抑えるように制御を行った場合でも、従来方式と同程度のプライバシー保護を実現できることがわかる。

4.4 電力使用量の異なる世帯に対して提案方式を適用した場合の平均相互情報量

図 5 に閾値 LP_{th} = 25 において電力使用量の異なる世帯に対して提案方式を適用した場合の平均相互情報量を示す。ここでは、月間電力消費量が 300kWh 未満、300kWh 以上 600kWh 未満、600kWh 以上 1200kWh 未満および

1200kWh の 4 つに世帯を分類する。図 5 より、提案方式では月間電力消費量に拘らず従来方式 SF-LS2 と同程度の平均相互情報量を得られることがわかる。ここで月間電力消費量の増大に伴って平均相互情報量が増大する理由として、蓄電池によって制御可能な電力量が相対的に低減することが挙げられる。

5. 結論

本論文では充放電に伴う金銭的不利益が生じないように閾値を設けることにより、同時に 2 世帯の使用電力量を秘匿する BLH 手法を提案した。提案方式では 2 世帯を同時に制御する上で各世帯の充放電量に差異が生じると金銭的な不公平が生じるため、実際の電気使用料と請求される電気使用料の差に閾値を設け、それを超えた場合に請求額がより大きい世帯が蓄電池を利用して請求額がより小さい世帯が蓄電池の充電を行うことで各世帯の電気使用料の負担の公平性を実現する。実際のデータセットを用いて計算機シミュレーションにより最大料金差および相互情報量の評価を行い、最大料金差を 10 円程度に収めることを可能とし、かつ従来方式と同程度のプライバシー保護を実現できることを示した。

参考文献

- [1] X. Fang, S. Misra, G. Xue, and D. Yang, "Smart grid - The new and improved power grid: A survey," IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 14, No. 4, pp. 944-980, Oct. 2012
- [2] 新田 恵子, 弥栄 邦俊, 後藤 義英, "スマートグリッドの基盤となる AMI システム," 東芝レビュー, Vol. 65, No. 9, 2010.
- [3] G.Q. Tang, "Smart Grid Management & Visualization," IEEE 8th International Conference & Expo on Emerging Technologies for a Smarter World, pp.1-6, Nov. 2011.
- [4] N. Batra, J. Kelly, O. Parson, H. Dutta, W. Knottenbelt, A. Rogers, A. Singh, and M. Srivastava, "NILMTK: an open source toolkit for non-intrusive load monitoring," Proceedings of the 5th international conference on Future energy systems, pp.265-276, June 2014.
- [5] S. Inagaki, T. Egami, T. Suzuki, H. Nakamura, and K. Ito, "Nonintrusive appliance load monitoring based on integer programming," Electrical Engineering in Japan, Vol. 174, Issue. 2, pp.18-25, Jan. 2011.
- [6] G. Kalogridis, C. Efthymiou, S.Z. Denic, T.A. Lewis, and R. Cepeda, "Privacy for Smart Meters: Towards Undetectable Appliance Load Signatures," IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), pp.232-237, Oct. 2010.
- [7] S. McLaughlin, P. McDaniel, and W. Aiello, "Protecting Consumer Privacy from Electric Load Monitoring," Proceedings of the 18th ACM conference on Computer and communications security, pp.87-98, Oct. 2011.
- [8] W. Yang, N. Li, and Y. Qi, "Minimizing Private Data Disclosures in the Smart Grid," Proceedings of the 2012 ACM conference on Computer and communications security, pp.415-427, Oct. 2012.
- [9] O. Tan, D. Gunduz, and H.V. Poor, "Increasing Smart

- Meter Privacy Through Energy Harvesting and Storage Devices," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 31, Issue. 7, pp.1331-1341, July 2013.
- [10] J. Zhao, T. Jung, Y. Wang, and X. Li, "Achieving Differential Privacy of Data Disclosure in the Smart Grid," IEEE International Conference on Computer Communications, 2014.
 - [11] パナソニック, "リチウムイオン蓄電システム LJ-SA32A5K," "<http://www2.panasonic.biz/es/souchikuene/chikuden/sys1-3/index.html>"
 - [12] NEC, "リチウムイオン電池搭載 家庭用蓄電池システム ESS-H-002006B," "http://jpn.nec.com/energy/aes/pdf/aes_home_catalog.pdf"
 - [13] 因幡電機産業, "業務用・家庭用リン酸鉄リチウムイオン蓄電池 GAA24-2300M-HJ," "<http://www.abaniact.com/glife/about/body/>"
 - [14] Pecan Street Dataport - A Universe of Data, Available Around the World, "<https://dataport.pecanstreet.org/>"
 - [15] 東京電力 料金単価表, "<http://www.tepco.co.jp/e-rates/individual/data/chargelist/chargelist01-j.html>"