

# ポリシーベース電力制御のための スマートタップの設計と実装

森本 尚之<sup>1,a)</sup> 藤田 有<sup>1</sup> 吉田 雅昭<sup>1</sup> 吉水 宏幸<sup>1</sup> 滝山田 昌文<sup>1</sup> 明比 輝一<sup>1</sup> 田中 真実<sup>1</sup>

**概要:** ユーザにとって低負担かつ効果的な電力マネジメントのために、ポリシーベース電力制御のためのスマートタップの設計と実装を行った。開発にあたっては正確な電力計測性能、様々な制御ポリシーを実行可能な計算能力、実生活環境での継続的な使用を考慮した安全性などを重視した。ポリシーベース電力制御の実用例として、ソフトウェアベースでの回路ブレーカ機能と、複数機器の突入電流の重なりを回避する機能とを実装し評価を行った。また実生活環境にてスマートタップを継続的に設置して、待機電力削減による省エネ機能や環境センサ情報を用いた家電の自動制御機能を実装した。

**キーワード:** 電力マネジメントシステム, スマートタップ, ポリシーベース電力制御

## The Design and Implementation of a Smart Outlet for Policy-based Power Management

**Abstract:** The design and implementation of a smart outlet for policy-based power management is described, which aims to reduce user's handwork required for power-saving activities and to realize efficient power control. The smart outlet has been designed to have an accurate power-sensing function, to have enough computational resources to execute various policy-based power management, and to be used safely in a real-life situation. As applications of policy-based power management, the authors have implemented and evaluated a software-based circuit breaker, and a function of reducing overlaps of inrush current caused by multiple appliances. The authors also have deployed the smart outlet in a real-life situation, and have implemented a function of reducing stand-by power and have realized automated control of appliances utilizing environmental sensor information.

**Keywords:** Energy Management System, Smart Outlet, Policy-based Power Management

### 1. はじめに

地球温暖化対策や石油資源の枯渇問題といった観点から、CO<sub>2</sub>排出量の削減、エネルギー消費の効率化、自然エネルギーの有効活用など求められている。わが国では、特に家庭での電力消費量が増加傾向にあることが以前から指摘されていたが、2011年の東日本大震災から波及して全国的に電力需給が逼迫したことにより、一般家庭における高度な電力マネジメントの重要性があらためて浮き彫りになった。近年、ユーザの電力消費データを収集し可視化する「電力消費の見える化」によってユーザの電力マネジメント活動を支援するシステムが実用化されており、一定の

効果が報告されている [17]。一方で、「見える化」により行動指針が示されたとしても、実際に電力マネジメントを行うためには手作業での機器制御が必要であるため、ユーザにとっては継続的な負担となる。

ユーザにとって低負担かつ効果的な電力マネジメントのために、ユーザの電力消費データを詳細に収集し、機器同士が情報通信により自律的・協調的に動作し、ユーザのおのの生活や電力消費パターンに適したポリシーに基づいて電力をプロアクティブに自動制御するような家庭内電力ネットワークが提案されている（例えば「エネルギーの情報化」 [11]）。その実現のためには、消費電力を計測し、他機器と情報通信を行い、家電に対する電力供給を制御するデバイスである「スマートタップ」が必要となる。スマートタップの機能には次のような項目が考えられる [16]：

<sup>1</sup> 株式会社エネゲート

<sup>a)</sup> morimoto.naoyuki@enagate.co.jp

- 計測機能：電力関連のさまざまな量を計測する機能。計測する値は瞬時電流、瞬時電圧、電流実効値、電圧実効値、有効電力など。
- 制御機能：電力を制御する機能。制御の種類としてはオン・オフ、電流制御、電圧制御などが考えられる。
- 通信機能：計測データ収集や制御のための、家庭内のホームサーバや外部のサーバなどへの通信、スマートタップ同士の連携のための通信、さらに接続された家電機器との通信を行う機能。
- その他の機能：インジケータなどのユーザインタフェースやロギング、温度や湿度センサなどの電力以外の情報の獲得機能など。

本稿ではわれわれの開発したスマートタップの設計と実装、ならびにその評価について述べる。設計と実装においては、計測の正確性と、様々なポリシーベース電力制御機能を実装可能な計算資源、ハード・ソフト両面での拡張性、そして実生活環境での継続的な利用に耐える安全性を重視した。他の機器（ユーザの情報端末や外部サーバ、他のスマートタップ）との通信や連携を容易とするため、汎用的な通信メディアやプロトコルを採用した。スマートタップによるポリシーベース電力制御の実現例として、電流値の監視によるソフトウェアベースでの回路ブレーカ機能と、停電からの復電時などに発生しうる複数機器の突入電流の重なりを回避する機能を実装し評価した。また、開発したスマートタップを実生活環境で継続的に使用し、電力消費データを収集しつつ、人感センサ情報を用いた待機電力の削減機能や、環境センサ情報を用いた家電の自動制御機能を実装し、省エネの自動化と生活の利便性向上を実現した。

本論文の構成は次の通りである。2節にて関連研究を述べる。次いで3節で、スマートタップの設計開発についてハードウェアとソフトウェアの両面から述べる。4節では計測機能の評価を示す。5節では、ポリシーベース電力制御機能の応用例として、ソフトベースの回路ブレーカ機能と、突入電流の重なり回避機能の実装と評価を述べる。また、本スマートタップの実生活環境における継続的運用と各種センサ情報を用いた電力制御について述べる。6節にまとめと今後の課題を示す。

## 2. 関連研究

電力制御を行わないタイプのスマートタップネットワークにより、いわゆる「電力消費の見える化」により電力の無駄使いを見い出す手法の研究は盛んに行われている [1][3][10]。電力制御の自動化に関する研究としては、たとえば Han らの待機電力削減システム [4] がある。Song らのシステム [15] は、ZigBee 通信を行うスマートタップ（ただし電力計測機能は持たない）と赤外線ノードの組み合わせにより、人の在・不在に応じた機器の自動オン・オフ制御を行う。電力制御ポリシーの効率的な生成方法については義

久らの提案がある [19]。また、ポリシーベースの電力制御システムとしては、システムの中央に位置するコントローラが制御内容を決定しスマートタップはその決定に従うという、いわゆる集中型のものも考えられる。集中型のシステムとしてはたとえば加藤らのオンデマンド型電力ネットワーク [9] や、Mrazovac らのシステム [14] が挙げられる。特に前者は、優先度に基づく家電の制御により、生活者の利便性を可能な限り損なわずに家庭全体の消費電力量を一定値以下に収めるシステムを実装している。

なお、われわれの開発したスマートタップは、コントローラからの制御命令に従う集中型システムの一要素としても、中央コントローラを持たない分散型のシステムとしても、あるいはスマートタップ単体であっても利用可能である。

スマートタップに類する機能を持つ市販製品としては、Belkin 社製の WeMo [2] が挙げられる。Wi-Fi を用いた外部からのオン・オフ制御と、タイマー機能によるオン・オフ制御が可能である。一方で電力計測機能は持たない。また、ユビキタス社製の iRemotap [20] は、Wi-Fi を用いた外部からのオン・オフ制御に加え、電力計測機能を持つ。計測したデータをクラウド上のサーバに収集し、ユーザに対する「見える化」サービスを提供する。ただしポリシーベースの自動制御の機能は持たない。

## 3. 設計と実装

本スマートタップは、製品としての開発ではなく、電力マネジメントシステムの研究プロジェクト「情報通信・エネルギー統合技術の研究開発」[5] における実証実験用の機器としての開発を行った。当プロジェクトにおけるスマートタップにはポリシーベース電力制御機能に加え、実証実験の一環として、液晶を用いた画面表示や音を用いたユーザへの通知機能などの様々なアプリケーションを搭載する可能性があったため、開発にあたってはコストやサイズよりも高機能性、高性能性や拡張性を重視した。また、義久らのスマートタップ [18] を開発の参考とした。これはポリシーベース電力制御を念頭に設計されており、Linux ボード Armadillo 220 (CPU ARM920T 200MHz, メモリ 32MB) を用いている [19]。このスマートタップのスペックを踏まえ、より正確な電力測定性能や、一般的なタップと同程度数のソケットを持つなどの実用性を重視した。

以上を踏まえて、われわれのスマートタップの計測に関する要件定義を表 1 に、制御に関する要件定義を表 2 に示す。電流や電圧の過渡的な変化を捉えることを可能とする高いサンプリング周波数 (20kHz) と分解能 (12bit)、ならびに A/D 変換においてレンジ切り替えを行うことによる全域での計測性能向上をはかった。誤差については電力量計と同等の計測性能 ( $\pm 2\%$ 以内) を要件とした。制御については、外部機器 (コントローラなど) からの制御だけで

表 1 計測に関するスマートタップの要件定義

項目	仕様	備考
定格電圧・電流	100V, 15A	
定格周波数	50Hz/60Hz	交流用
計測項目	積算電力, 瞬時電力, 電圧, 電流	電流や電圧の過渡的な変化を捉える
分解能	12 ビット	電力量計と同等の計測性能
サンプリング周波数	20kHz	電流や電圧の過渡的な変化などを捉えるため, 高いレートでのサンプリングを行う
誤差	±2% 以内	0.5A~15A, レンジ切り替えによる全域での計測性能向上

表 2 制御に関するスマートタップの要件定義

項目	仕様	備考
負荷制御	リレーを内蔵	外部からの制御だけでなく, 負荷監視によるリレー開放など, ソフトウェアシーケンスによる監視制御機能を設ける
通信インタフェース	Wi-Fi	パソコンなどとの通信を考慮し, 最も汎用的な通信方式を採用
拡張	USB	各種センサ類などの拡張のために設ける

なく, たとえば負荷監視によるリレー開放やソフトウェアシーケンスによる監視制御機能などといったポリシーに基づく制御をスマートタップ単体でも実行できるものとした。なお, 他機器からの電力制御が可能な家電 (いわゆる「スマート家電」) が普及していない現状では, 制御機能はリレーのオン・オフに留めるのが現実的と考えた。通信インタフェースは最も汎用的と考えられる Wi-Fi を採用した。また, 将来的な拡張のための USB ポートを要件とした。

この要件定義に基づき実装したスマートタップのスペックを表 3 に, 写真を図 1 にそれぞれ示す。制御機能として, 4つのソケットごとのリレーのオン・オフ機能を実装した。また, 様々なポリシーベース電力制御機能を実装ならびに実行可能とする計算資源と拡張性を持つものとした。そのほか, 実生活環境での継続的な使用のために, 筐体には難燃性の素材を用いるなど安全性に配慮した。ソフトウェア面では, Linux OS 上に様々な制御ポリシーを実装可能とした。データフォーマットは XML ライクなものとし, 拡張性と人間に対する可読性を持たせた。他機器との通信プロトコルは汎用的な TCP/IP ソケット通信ならびに HTTP/CGI を用いた。

ミリ秒オーダーでの正確なリアルタイム計測機能と, 外部機器との通信やポリシーベース電力制御のようにより高度なアプリケーションの実行能力とを両立するため, 計測



図 1 開発したスマートタップの外観写真

表 3 開発したスマートタップのスペック

計測項目	瞬時電力, 積算電力 電流値, 電圧値
サンプリング周波数	20kHz
分解能	12bit
電力制御機能	リレーのオン・オフ制御
計測誤差	2% 以下
ソケット数	4
ステータス表示	各ソケットのオン・オフ状態
定格電圧	AC 100V
定格電流	15A (全ソケットの合計値)
OS	Debian Linux (アプリケーション基板)
CPU	ARM926 400MHz (アプリケーション基板) TM S320F28035 60MHz (計測・制御基板)
メモリ	128MB RAM, 32MB FLASH (アプリケーション基板)
拡張性	2つの USB 2.0 ポート
通信メディア	Wi-Fi (USB 接続) (うち 1つは Wi-Fi インタフェース用)
通信プロトコル	TCP/IP ソケット通信, HTTP/CGI

と制御を担当する基板と, アプリケーションを担当する基板とを組み合わせて設計と実装を行った。以下, 前者を計測・制御基板, 後者をアプリケーション基板と呼ぶこととする。アプリケーション基板は Linux OS, USB, Wi-Fi など汎用的なソフトウェアやインタフェース, デバイスが使えものを採用した。以下, ハードウェアとソフトウェアのそれぞれの実装について述べる。

### 3.1 ハードウェア

ハード構成を図 2 に示す。アプリケーション基板, 計測・制御基板, リレー基板, 電源基板, ならびに CT から成る。以下, それぞれの基板の機能と実装について述べる。

#### 3.1.1 アプリケーション基板

計測・制御基板と通信し, 計測データの取得やリレーの制御指令を行う。また, 外部機器との通信機能やポリシーベースの電力制御機能を担う。市販の組み向け Linux

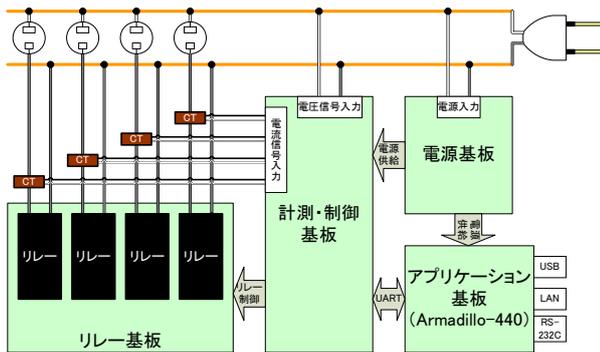


図 2 スマートタップのハード構成図

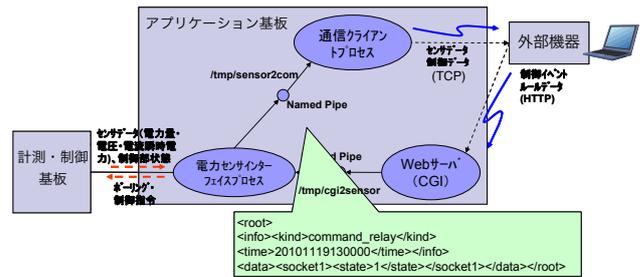


図 4 アプリケーション部のプロセス間通信

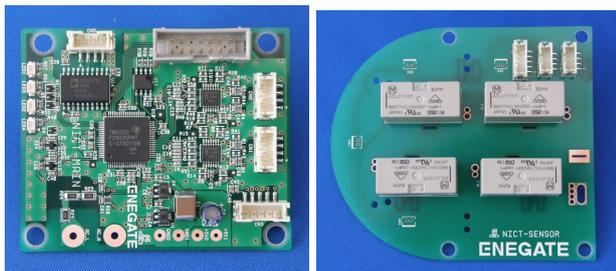


図 3 左：計測・制御基板，右：リレー基板

ボードである Armadillo 440 (アットマークテクノ社製) を採用した。これは様々なポリシーベース電力制御を行うに十分な計算資源を持つ (CPU: ARM926 400MHz, メモリ: 128MB RAM / 32MB FLASH)。拡張性として 2 個の USB 2.0 ポートを持つ。そのうち 1 ポートは Wi-Fi インタフェースに利用し、残り 1 ポートは環境センサ等を用いた機能拡張を想定している。

### 3.1.2 計測・制御基板

電流値と電圧値の計測と、瞬時電力ならびに積算電力値の算出を行う。また、リレー基板に対して開閉制御の信号を送信する。CPU は DSP マイコン TM S320F28035 60MHz (TI 社製) を用いた。写真を図 3 の左側に示す。

### 3.1.3 リレー基板

各ソケットをオン・オフ制御するための機械式リレーを持つ。計測・制御基板からの制御信号によりリレーの開閉を行う。写真を図 3 の右側に示す。

### 3.1.4 電源基板

AC100V の入力を DC5V に変換し、アプリケーション基板と計測・制御基板に電力を供給する。

### 3.1.5 安全性

電力量計規格 JIS C 1271-1 を参考として、特に絶縁抵抗、商用周波耐電圧の項目について試験し基準を満たしていることを確認した。また、電気用品安全法 (PSE) を参考として、特に空間距離、沿面距離について試験し基準を満たしていることを確認した。筐体は UL94-V0 等級の難燃性を持つ素材を用いている。

## 3.2 ソフトウェア

まず計測・制御基板でのソフト処理について述べる。CT により得た各ソケットごとの電流値と AC100V の電圧値を、サンプリング周波数 20kHz, 分解能 12bit で A/D 変換し、その結果を基に電流実効値、電圧実効値、瞬時電力値ならびに積算電力値を計算する。アプリケーション基板内の電力センサインタフェースプロセス (後述) からのデータ要求に応じて、計測ならびに計算により得たデータ (電流値、電圧値、瞬時電力、積算電力) を 50 ミリ秒間隔で送信する。また、電力センサインタフェースプロセスからのリレー制御メッセージを受信し、リレー基板へ制御信号を出力する。

次いでアプリケーション基板上のソフトウェアについて述べる。OS として組込み向け Debian Linux が動作する。その上で、主に電力センサインタフェースプロセス、通信クライアントプロセス、Web サーバ/CGI の 3 つの主要なソフトウェアが動作する。このうち、電力センサインタフェースプロセスと通信クライアントプロセス、ならびに電力インタフェースプロセスと Web サーバ/CGI は、それぞれ名前付きパイプを介したテキストベースの通信を行う。

以下、それぞれのソフトウェアの機能とデータフォーマットを述べる。

### 3.2.1 電力センサインタフェースプロセス

計測・制御基板とシリアル通信 (UART) を行う。50 ミリ秒間隔で計測・制御基板から送られてくる計測データを受信し、後述するデータフォーマットに変換し、名前付きパイプを経由して通信クライアントプロセスへと送信する。また、Web サーバ/CGI から送られてくる制御メッセージを XML 解析し、リレーに対する制御命令に変換して計測・制御基板に送信する。

### 3.2.2 通信クライアントプロセス

電力センサインタフェースから受信した電力計測データを 0.5 秒間隔で外部の機器へと送信する。通信プロトコルは汎用的な TCP/IP ソケット通信を用いている。

### 3.2.3 Web サーバ/CGI

外部機器 (スマートフォンやサーバ、他のスマートタップなど) からの制御メッセージを受信する。受信した制御メッセージを、名前付きパイプを介して電力センサイ

インタフェースプロセスへと送る。

### 3.3 データフォーマット

リレー制御のためのメッセージと、電力計測データ通知のためのメッセージのフォーマットはXMLライクなものを定義した。これは、将来的なタグの追加（環境センサ情報など）に備えた拡張性と、人間にとっての可読性向上を意図している。

#### 3.3.1 リレー制御メッセージ

リレーを制御するためのメッセージ `command_socket` の例を示す。下記の例では、リレー1をオン、リレー2をオフ制御する。

```
<root>
  <info>
    <kind>command_socket</kind>
  </info>
  <data>
    <socket1><state>ON</state></socket1>
    <socket3><state>OFF</state></socket3>
  </data>
</root>
```

#### 3.3.2 計測データ通知メッセージ

計測した電力データを通知するメッセージ `notice_wattmeter` の例を示す。これは2012年9月9日10時48分54秒039ミリ秒において、例えばソケット1は積算電力が20954Wh、瞬時電圧が102.070V、電流が1.551A、瞬時電力が84.6Wであり、リレー状態がオンであったことを意味する。他のソケットも同様である。

```
<root>
  <info>
    <kind>notice_wattmeter</kind>
    <time>20120909104854039</time>
  </info>
  <data>
    <socket1><wh>20954</wh><volt>102.070</volt>
      <current>1.551</current><watt>84.6</watt>
      <state>ON</state></socket1>
    <socket2><wh>2536</wh><volt>102.085</volt><
      current>0.013</current><watt>4.1</watt><
      state>ON</state></socket2>
    <socket3><wh>2499</wh><volt>102.073</volt><
      current>0.242</current><watt>14.2</watt>
      <state>ON</state></socket3>
    <socket4><wh>1219</wh><volt>102.080</volt><
      current>0.081</current><watt>5.1</watt><
      state>ON</state></socket4>
  </data>
</root>
```

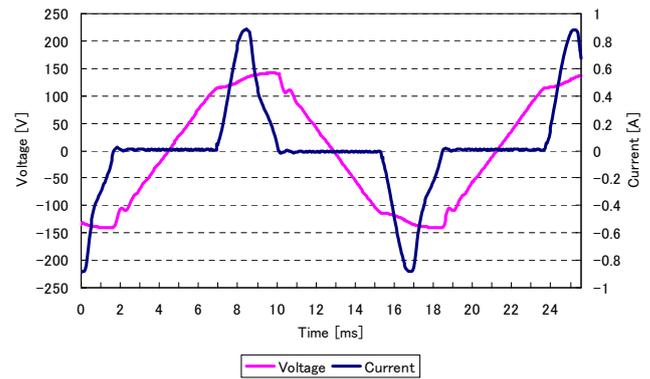


図5 インバータ蛍光灯の電圧波形と電流波形

## 4. 計測性能の評価

計測性能の評価として、電力計測誤差、電圧計測誤差、電流計測誤差を測定した。電力については JIS C 1271-1: 電力量計（単独計器）で規定される100%から3.3%の範囲で誤差を測定した。電圧については80Vから120Vまで変化させて測定した。また、電流については100%(15A)から0.033%(5mA)の領域にて測定した。それらの結果、電力計測誤差は2%未満、電圧計測誤差は0.1%未満、電流計測誤差は0.2%未満であった。定格(100V, 15A)に対する0.033%の電流は約5mAであるため、0.5W程度の待機電力であっても正確に測定できることを示している。

図5にスマートタップで計測したインバータ蛍光灯の電圧波形と電流波形を示すが、インバータ機器独特の波形のひずみが取得できており、電流・電圧の過渡的な変化を明確に捉えている。この例では電流と電圧のピークのタイミングが重なっており、瞬間的に大きな電力となることが把握できている。これより、電流波形からの家電認識 [6] [7] 等が可能な性能を持っていると考えられる。

## 5. ポリシーベース電力制御の実装と実用例

本節では、開発したスマートタップを用いたポリシーベース電力制御機能の例として、ソフトウェアベースでの回路ブレーカ機能と、複数機器の突入電流の重なりを回避する機能の実装と評価、ならびに実生活環境でのスマートタップの運用と各種センサ情報を用いた家電制御を示す。

### 5.1 ソフトウェアベースでの回路ブレーカ機能

現在家庭の分電盤に設置されているブレーカではコンセント単位での電流制限はできず、過電流発生による遮断時には必要以上に広い範囲で電力供給が停止する。また、既存のブレーカは一般に熱動式あるいは電磁式であるが、これらは物理特性上、状況によって遮断が実行されるまでの時間に幅があるため、たとえば「15Aが2秒続いたら遮断」といった細かな条件に基づく動作は難しい。そこで、

スマートタップ上にソフトウェアベースの回路ブレーカ機能を実装した。この機能の利点は、遮断が働く電流の閾値と遮断までの時間とを任意に設定でき、設定値で定めた時間で遮断が確実に行われることである。家電ごとに適した条件設定をするため、電流値と経過時間のパラメータはソケット個別に設定することを可能とした。また、基準値からの大幅な超過はすぐに遮断する一方で、わずかな超過であればある程度の時間猶予を見てから遮断するという柔軟な設定を行うため、例えば「コンセント1は5Aを基準として120%の電流値で10秒経過、または150%の電流値で3秒経過すると回路遮断」といった2段階での設定を可能とした。さらに、4つのソケットの電流値の合計に基づく回路遮断機能も実装した。この機能を用いると、電流の合計値が閾値を設定時間以上にわたり継続した場合に全てのリレーがオフ制御される。本機能の概要を図4に示す。以下、実装と評価を示す。

### 5.1.1 実装

ソケットごとの電流値に基づく回路ブレーカ機能は、各ソケットの電流値を監視し、閾値からの電流超過が設定時間以上にわたり継続した場合に当該ソケットに対してリレーのオフ制御を行う。閾値は、各ソケットごとに定めた基準電流値および閾値監視パーセントから算出する。たとえば基準電流値が5A、閾値監視パーセントが120%のとき、閾値は $5A \times 1.2 = 6A$ となる。閾値監視パーセントおよび遮断までの時間はソケットごとに2つまで登録できる。一方、全ソケットの電流値の合計に基づく回路ブレーカ機能は、閾値からの超過が設定時間以上にわたり継続した場合にすべての回路が遮断される。デフォルトの基準値はスマートタップの定格電流値である15Aであり、閾値監視パーセントは120%としている。基準電流値などのパラメータはWebサーバ/CGI経由で外部から設定することができる。また、遮断が行われる前のユーザに対する警告として、閾値超過時には本体のLEDランプが赤点滅する。

### 5.1.2 実験と評価

以下の条件設定での動作確認を行った。

- コンセント単位での制限超過：「単一のコンセントについて、5Aを基準として120%の電流が1秒間流れた時点で回路遮断」という設定下で6Aの電流を通电した結果、1秒後に回路遮断が正しく実行された。
- 複数コンセントの合計値での制限超過：「4つのコンセントの合計値として、15Aを基準として120%の電流が1秒間流れた時点で回路遮断」という設定下で合計18Aの電流を通电した結果、1秒後に回路遮断が正しく実行された。

## 5.2 突入電流の重なりを回避する機能

電気機器の中には、電源投入の直後に一時的に、機器の定格電流をはるかに越える大きな電流（いわゆる突入電

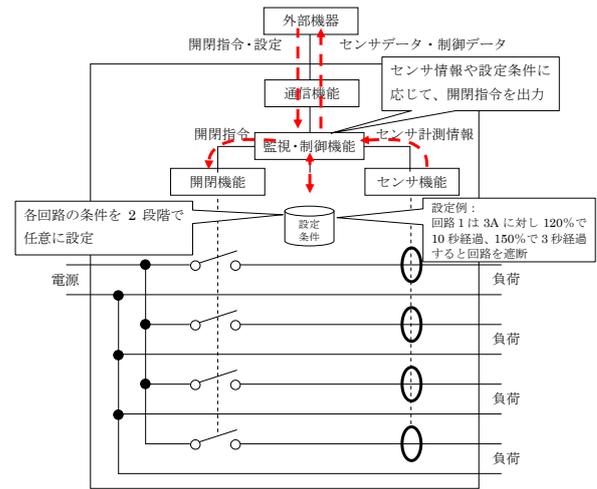


図6 ソフトウェアベースの回路ブレーカ機能

流)が発生するものがある。停電からの復電時などにおいて、突入電流の大きな機器が複数個同時に電源投入された場合、突入電流が複数重なってきわめて大きな電流となる。これにより分電盤に備えられているブレーカーが動作して回路遮断が発生したり、電源電圧の不安定化やそれに伴う他機器への悪影響が起こる。特に太陽光等の分散電源を単独で運転する等の場合、電源容量が限られているため、突入電流による電圧低下が発生しやすい。こうした問題に対しては、大きな突入電流に耐えうる電源容量や回路を備えることが考えられるものの、コストの面で問題がある。

そこで、スマートタップを用いた解決方法として、複数機器へのリレーのオン制御のタイミングをずらすことで突入電流の重なりを回避する機能を実装した。以下ではその実装、実験と評価を述べる。

### 5.2.1 実装

複数のソケットを同時にオン制御する際に、計測・制御基板に対して複数の制御メッセージを同時に送るのではなく、1つのソケットに対する制御メッセージを送り、次いで実用上支障が無い程度の遅延時間後に次のソケットに対する制御メッセージを送信することで、突入電流の重なりを回避する。遅延時間は、オン制御するソケットから電力供給される家電が持つ突入電流の特性（突入電流が発生する時間幅）に合わせて設定する。

### 5.2.2 実験と評価

家電機器として2個の白熱電球（同一機種）を用いた実験を行った。白熱電球は、電源投入の瞬間からフィラメントの温度が安定するまで突入電流が発生することが知られている。用いた白熱電球の定格は100Wであり、単体での突入電流は9.528A（10回の計測の平均値）であった。突入電流は電源投入後20ms程度に発生していたため、遅延の間隔は電球として実用上支障をきたさず、かつ若干のマージンを取った値として50msと設定した。

突入電流重なり回避機能を用いない場合における、2個

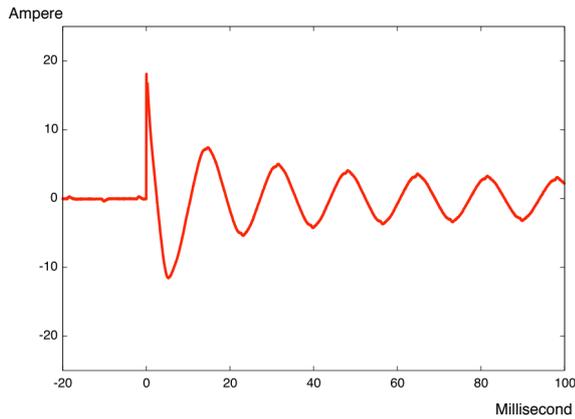


図 7 2 個の白熱電球の電流波形 (突入電流重なり回避無し)

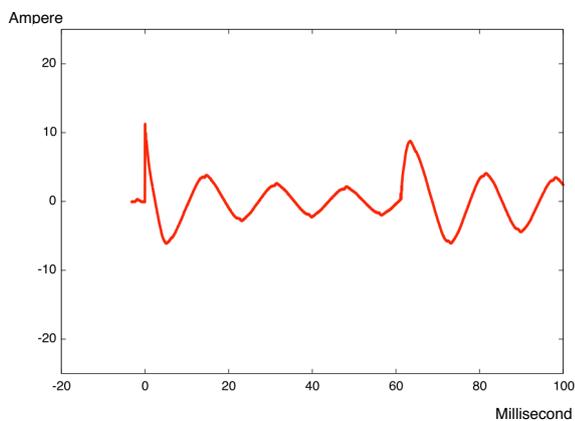


図 8 2 個の白熱電球の電流波形 (突入電流重なり回避有り)

の白熱電球の同時投入時の電流のピーク値は 19.296A (10 回の測定の平均値) であった。その電流波形の一例を図 7 に示す。この例では 2 つの突入電流が重なった結果、ピーク時の電流値は 18.10A となっている。一方、突入電流重なり回避機能を用いて、2 つのリレーのオン制御メッセージのタイミングを 50ms ずらした際の電流のピーク値は 13.238A (10 回の測定の平均値) となった。これは本機能を用いない場合に比べて約 31% のピークカットとなる。その電流波形の一例を図 8 に示す。この例ではピーク時の電流値は 11.26A である (なお、通信処理、ソフト処理、リレー制御に十数ミリ秒を要したため、実際に 2 個目のリレーがオンとなったのは 63ms 付近である)。

### 5.3 実環境での運用と各種センサ情報を用いた家電制御

開発したスマートタップを実生活環境や実証実験用住宅において 2012 年 9 月より継続的に運用している [12]。たとえば図 9 に示すように、一人暮らしのワンルームマンションにスマートタップを 4 台配置し、(住居備え付けの照明等を除く) ほぼ全ての家電機器の 0.5 秒ごとの電力消費情報をサーバへと収集している。ある 1 時間における家電機器の消費電力データを図 10 に示す。電力消費の大きな

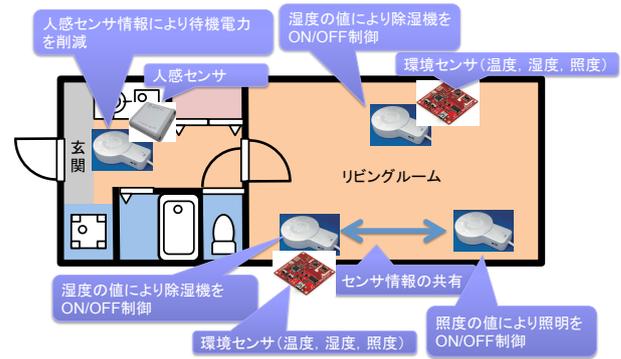


図 9 実生活環境におけるスマートタップの運用

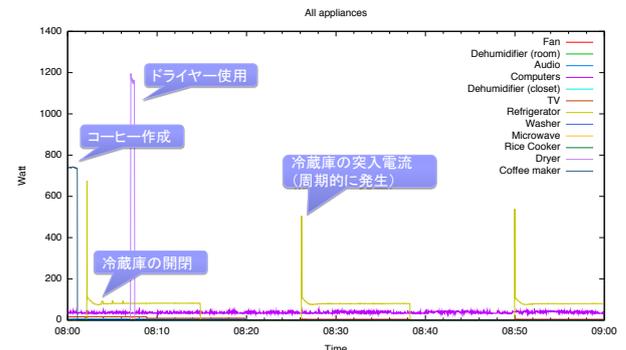


図 10 ある一時間における消費電力の変動

変動からコーヒーメーカーやドライヤーの利用がわかる。さらに冷蔵庫の消費電力の微小な変動が記録されているが、この変動は居住者の冷蔵庫の開閉により発生したものである。このように収集した電力消費データから居住者の生活行動を見出すことができる。

また、居住者の生活行動パターンに適した家電の制御ポリシーをスマートタップに実装した。たとえば、スマートタップの OS が持つ標準的なスケジューリング機能 (Cron) を用いて、例えば平日の指定した時刻にコーヒーメーカーを起動させるといった自動制御を行っている。さらに、スマートタップの拡張性を生かして、人感センサや環境センサ (温度、湿度、照度) を USB ポートを用いてインストールし、居住者の不在時にオーディオ機器の待機電力をカットする省エネ機能や、湿度情報に基づく除湿器の自動制御等の機能を実装することで利便性を向上している。

なお、実生活環境でスマートタップを利用する中で回路ブレーカ機能が実際に働くことがあった。これは、居住者が意図せず電子レンジとドライヤーを同時に利用し、消費電流の合計値が定格 15A を超えていたためである。これにより、実生活環境においても、過電流による発熱等を回路ブレーカ機能により緩和できていると考えられる。

## 6. まとめと今後の課題

電力マネジメントを自動化しユーザの負担を軽減するこ

とを目的として、ポリシーベース電力制御を可能とするスマートタップの設計と実装を行った。ポリシーベース電力制御機能の実用例として、ソフトウェアベースでの回路ブレーカ機能と、複数機器の突入電流の重なりを回避する機能を実装し評価した。さらに、開発したスマートタップを実生活環境で継続的に利用し、自動的な待機電力削減による省エネや、家電の自動制御による利便性向上を実現した。

以下、今後の課題と方向性について述べる。現状のスマートタップは通常のタップに比べサイズが大きい。これは4つのソケットにリレーを搭載していること、そして安全のためにリレー間に十分な距離を確保していることに起因する。しかし実環境での運用においては特にサイズに関する要望が強いため、現在小型化を検討している。

電力制御の種類として、現在はリレーによるオンオフ制御のみであるが、いわゆるスマート家電が将来的に外部から制御可能となれば、スマートタップから家電をコントロールすることで、より高度な電力制御が可能となる。

回路ブレーカ機能については、制御アルゴリズムの拡張を検討し、実装と評価を行っている [13]。なお、遮断が働く前にはLEDライトの赤点滅による警告機能があるが、実運用において遮断が働いた際にはユーザは警告に気づかなかった。従って、警告音を用いるなどのより能動的な通知手段が望ましい。

突入電流重なり回避機能については、今回の実験は単一種類の白熱電球が2個というシンプルな状況で行ったが、実環境では異なる突入電流のパターンを持つ様々な家電が混在するため、遅延時間の最適化は複雑になる。

## 謝辞

ご助言を賜った京都大学岡部寿男教授に深謝する。なお本研究はNICT 高度通信・放送開発委託研究「情報通信・エネルギー統合技術の研究開発」による。ここに深謝する。

## 参考文献

- [1] K. Abe, H. Mineno and T. Mizuno, "Development and Evaluation of Smart Tap Type Home Energy Management System Using Sensor Networks", Proc. IEEE Consumer Communications & Networking (CCNC), pp.1050-1054, 2011.
- [2] Belkin, WeMo, <http://www.belkin.com/us/wemo>
- [3] C. Choi, W. Park, J. Han and I. Lee, "The Architecture and Implementation of Proactive Green Home Energy Management System," Proc. IEEE Information and Communication Technology Convergence (ICTC), pp.457-458, 2010.
- [4] J. Han, C. Choi and I. Lee, "More Efficient Home Energy Management System Based on ZigBee Communication and Infrared Remote Controls," IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol.57, Issue.1, pp.85-89, 2011.
- [5] ICE-IT: Integration Technology of Information, Communication and Energy, <http://www.net.ist.i.kyoto-u.ac.jp/ice-it/index.php>
- [6] M. Ito, R. Uda, S. Ichimura, K. Tago, T. Hoshi and Y. Matsushita, "A Method of Appliance Detection Based on Features of Power Waveform", Proc. IEEE/IPSJ International Symposium on Applications and the Internet (SAINT), pp.291-294, 2004.
- [7] T. Kato, H. Cho, D. Lee, T. Toyomura and T. Yamazaki, "Appliance Recognition from Electric Current Signals for Information-Energy Integrated Network in Home Environments", International Journal of Assistive Robotics and Systems (IJARS), Vol. 10, No. 4, pp. 51-60, 2009.
- [8] 加藤丈和, 松山隆司, i-Energy Profile: スマートタップネットワークによるエネルギーの情報化プロファイル, 電子情報通信学会論文誌 B Vol. J94-B, No.10, pp.1232-1245, 2011.
- [9] T. Kato, K. Yuasa and T. Matsuyama, "Energy on Demand: Efficient and Versatile Energy Control System for Home Energy Management", Proc. IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGrid-Comm), pp.410-415, 2011.
- [10] J. Lifton, M. Feldmeier, Y. Ono, C. Lewis and J. Paradiso, "A Platform for Ubiquitous Sensor Deployment in Occupational and Domestic Environments," Proc. The International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), pp.119-127, 2007.
- [11] T. Matsuyama, "Creating Safe, Secure, and Environment-Friendly Lifestyles through i-Energy", New Breeze, Vol.21, No.2, pp.1-8, 2009.
- [12] N. Morimoto, Y. Fujita, M. Yoshida, H. Yoshimizu, M. Takiyamada, T. Akehi and M. Tanaka, "Smart Outlet Network for Energy-aware Services Utilizing Various Sensor Information", Proc. International Workshop on Energy-Aware Systems, Communications and Security (EASyCoSe), pp.1630-1635, 2013.
- [13] N. Morimoto, Y. Fujita, M. Yoshida, H. Yoshimizu, M. Takiyamada, T. Akehi and M. Tanaka, "Optimizing Power Allocation to Electrical Appliances with an Algorithm for the Knapsack Problem", Proc. International Symposium on Consumer Electronics, to appear.
- [14] B. Mrazovac, M.Z. Bjelica, N. Teslic and I. Papp, "Towards Ubiquitous Smart Outlets for Safety and Energetic Efficiency of Home Electric Appliances", Proc. IEEE International Conference on Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin), pp.322-326, 2011.
- [15] G. Song, F. Deng, W. Zhang and A. Song, "A Wireless Power Outlet System for Smart Homes", IEEE Transaction on Consumer Electronics, Vol.54, Issue 4, pp.1688-1691, 2008.
- [16] 塚本昌彦, 加藤丈和, スマートタップの共通仕様化に向けて, 情報処理, Vol. 58, No. 8, pp.934-942, 2010.
- [17] T. Ueno, R. Inada, O. Saeki and K. Tsuji, "Effectiveness of an Energy-consumption Information System for Residential Buildings", Applied Energy, Vol.83, Issue 8, pp.868-883, 2006.
- [18] T. Yoshihisa, N. Fujita and M. Tsukamoto, "HEMS Toolkit: A Toolkit for Constructing a Home Energy Management System", Proc. IEEE Consumer Communications & Networking (CCNC), pp.822-823, 2011.
- [19] T. Yoshihisa, N. Fujita and M. Tsukamoto, "A Rule Generation Method for Electrical Appliances Management Systems with Home EoD", Proc. IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp.253-255, 2012.
- [20] ユビキタス, iRemoTap, <http://www.ubiquitous.co.jp/products/conceptlaboratory/iremotap/>