

スマートグリッド向け要素技術の調査研究

～消費電力の見える化技術～

中川 健司* 大高 理秀* 平間 毅* 戸塚 貴之*

1. はじめに

2011年3月11日の震災以降、東京電力管内では電力供給不足が深刻化し、昨夏においては、電気事業法に基づき契約電力500kW以上の電力使用事業所に対して前年比で対象期間・時間帯における使用最大電力の15%削減が義務付けられた。また、法的強制力はないものの一般家庭に対しても前年比15%節電の目標が掲げられている。今夏も電力不足が懸念されるなか、県内中小企業でも電気の使い方を改めて見直そうという動きが見られ、そのためのツールとして電力見える化システム、特に各分電盤や各電気機器の消費電力を簡易的に把握できるシステムに対するニーズが高まっている。

このような背景から、当センターでは、以前から蓄積のあるセンシング技術、マイコン技術、無線通信技術等の基盤技術を活用して、各分電盤や電気機器の消費電力を簡易的に測定できるシステムを試作した。なお、本事業は2年間の事業であり、H23年度は電力見える化システムの試作を行い、H24年度はH23年度に試作したシステムをもとに実証実験を行う予定である。

2. 目的

本調査研究では、クランプ式とタップ式の電力センサモジュール開発、それらをノードとした無線センサネットワークの構築及びサーバーサイドアプリケーションの開発を行うことにより、コンセントに接続された電気機器や分電盤内各系統における消費電力の見える化を実現することを目的とする。

3. 研究内容

3.1 電力見える化システムの概要

開発した電力見える化システムの構成を図1に示す。

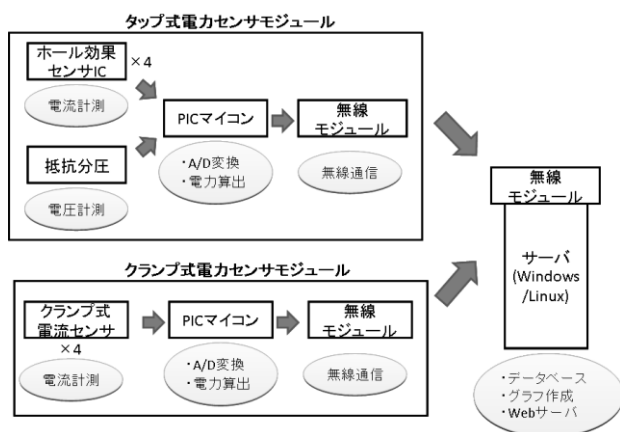


図1 電力見える化システムの構成

タップ式電力センサモジュール及びクランプ式電力センサモジュールにおいて取得した電力データを無線

通信でWebサーバまで伝送し、Webサーバ内のデータベースに保存する。消費電力のグラフはそのデータベースをもとに作成され、Webブラウザの要求に対して、Webサーバがグラフ情報を含むHTMLを配信することでクライアント側の電力見える化が実現される。

以下、個別の要素技術について詳細を述べる。

3.2 クランプ式電力センサモジュールの開発

開発したクランプ型電力センサモジュールの外観及び内部をそれぞれ図2及び図3に示す。開発に用いた主要部品は次の通り。

- ・PIC マイコン
PIC24FJ64GA002 (Microchip Technology Inc.)
- ・無線モジュール
XBeeRF モジュール XB24-Z7CIT-004 (Digi International Inc.)
- ・クランプ式電流センサ
超小型クランプ式交流電流センサ CTL-10-CLS (株式会社ユー・アール・ディー)
- ・006P型9V電池
- ・三端子レギュレータ 3.3V500mA

センサモジュールは9V電池駆動とし、三端子レギュレータで3.3Vに降圧した後、PICマイコン及びXBeeRFモジュールに電源供給される。

PICマイコンでは、クランプ式電流センサからの電圧出力を図4のように100 μ s毎に200点サンプリングし、10bitAD変換で取得した電圧を電流値に変換した後、式1により交流1サイクル(20ms)の間の二乗の時間平均の平方根を計算することで電流の実効値を求めている。なお、クランプ式電力センサモジュールでは、電圧計測を行っておらず、電圧を100V、力率を100%と仮定して電力の算出を行った。

また、PICマイコンのデジタル出力を用いてXBeeRFモジュールのスリープ設定を行っており、PICマイコンのプログラムを書き換えることで電力を測定する時間間隔及び取得データをサーバへ送信する時間間隔を自由に設定することができる。

なお、クランプ式電流センサは最大4個まで取り付け可能とした。

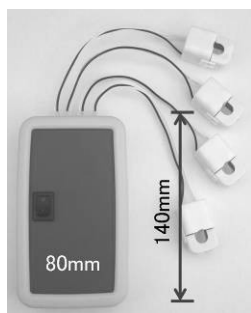


図2 クランプ式電力センサモジュールの外観

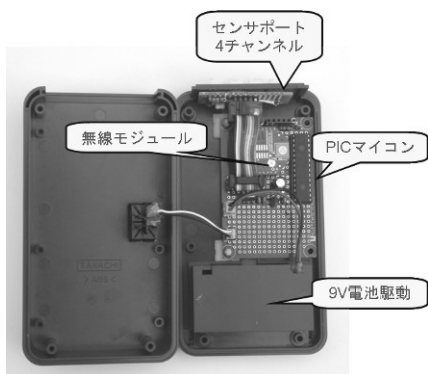


図3 クランプ式電力センサモジュールの内部

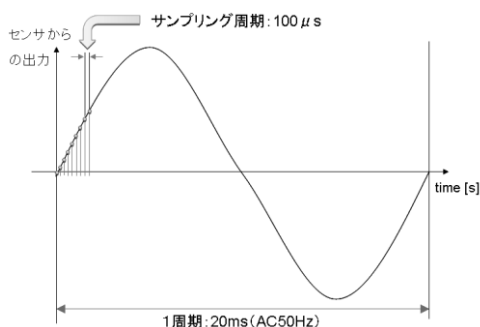


図4 サンプルングのイメージ図

式1 実効電流値
$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n i_j^2}$$

n : サンプルング数
 i_j : j 番目にサンプルングした電流値

3.3 タップ式電力センサモジュールの開発

開発したタップ式電力センサモジュールの外観及び内部をそれぞれ図5及び図6に示す。開発に用いた主要部品は次の通り。

- PIC マイコン
PIC24FJ64GA002 (Microchip Technology Inc.)
- 無線モジュール
XBeeRF モジュール XB24-Z7CIT-004 (Digi International Inc.)
- ホール効果センサ IC ACS712ELCTR-20A-T (Allegro Microsystems)
- AC-DC コンバータ BP5710-1 (ローム株式会社)
- 三端子レギュレータ 5V100mA

- 三端子レギュレータ 3.3V500mA

センサモジュールは AC100V 駆動とし、AC-DC コンバータによって DC12V まで降圧後、三端子レギュレータにより 5V 及び 3V まで降圧し、それぞれホール効果センサ (5V)、PIC マイコン (3.3V)、XBeeRF モジュール (3.3V) に電源供給される。

PIC マイコンでは、ホール効果センサ IC の電圧出力及び AC 入力電圧を分圧した電圧を $100 \mu s$ 毎に 200 点サンプルングし、10bitAD 変換で取得した電圧をそれぞれ電流値及び AC 入力電圧へ変換した後、式1、式2により交流 1 サイクル (20ms) の間の二乗の時間平均の平方根を計算することで電流及び AC 入力電圧の実効値を求めている。また、式3により電流と電圧の積の時間平均を計算することで消費電力を算出し、併せて、式4により、先に求めた皮相電力 (電流の実効値と電圧の実効値の積) との割合から力率を計算した。

なお、クランプ式電力センサモジュールと同様、PIC マイコンのデジタル出力を用いて XBeeRF モジュールのスリープ設定を行っており、PIC マイコンのプログラムを書き換えることで電力を測定する時間間隔及び取得データをサーバへ送信する時間間隔を自由に設定可能とした。



図5 タップ式電力センサモジュールの外観

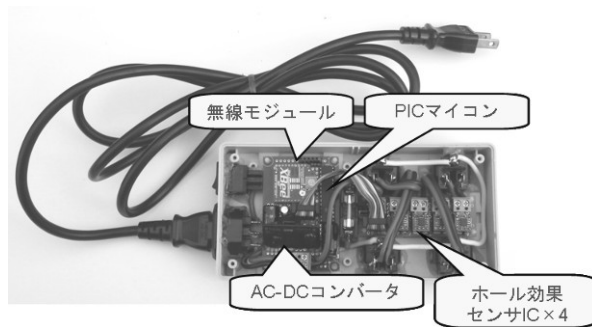


図6 タップ式電力センサモジュールの内部

式2 実効電圧値
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_j^2}$$

n : サンプルング数
 v_j : j 番目にサンプルングした電圧値

式3 消費電力
$$P = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (v_j \times i_j)$$

n : サンプルング数

v_j : j 番目にサンプリングした電圧値

i_j : j 番目にサンプリングした電流値

式4 力率 $\phi = \frac{P}{I_{rms} \times V_{rms}}$

3.4 XBeeRF モジュールの設定

本システムの無線通信においては家電向け短距離無線通信規格である ZigBee を採用した。ZigBee は低速 (RF データ速度 250kbps) で転送距離が短い代わりに、安価で消費電力が少ない、またルータのデータ中継により直接電波の届かない端末間でも通信が可能という特徴を有しており、ワイヤレスセンサネットワークの構築に適した規格となっている。なお、ZigBee の基礎部分の仕様は IEEE802.15.4 として規格化されており、論理層以上の機器間の通信プロトコルについては ZigBee Alliance (<http://www.zigbee.org/>) により仕様の策定が行われている。

ZigBee ネットワークの構成モジュールはコーディネータ、ルータ、エンドデバイスの3種類からなるが、XBeeRF モジュール(図6)では、専用ソフトウェア X-CTU を用いることで3タイプのいずれにも設定が可能である。ここで、XBeeRF モジュールにはシリーズ1とシリーズ2があり、ZigBee のファームウェアはシリーズ2にしか対応していないので注意を要する。本システムでは電力センサモジュールの XBeeRF モジュールをエンドデバイスまたはルータに、サーバに接続される XBeeRF モジュールをコーディネータに設定した。

また、XBeeRF モジュールには透過モードと API モードの2種類が存在するが、今回は API モードを用いてネットワークを構築した。その他、XBeeRF モジュールの主な設定については次の通り。

- コーディネータ、ルータ、エンドデバイスの PANID に共通の値を設定する。
- エンドデバイスの Sleep Mode を PIN HIBERNATE に設定する。SLEEP_RQ ピン (9 番ピン) を PIC マイコンのデジタル出力に接続することで制御を行う。
(SLEEP_RQ=High で Sleep, SLEEP_RQ=LOW で Wakeup) Sleep 設定を有効に利用することで消費電力を削減することができる。(Sleep 時消費電流は $1\mu\text{A}$ 以下、Wakeup 時の消費電力は $30\sim 40\text{mA}$)
- API Enable を 2 に設定し、escape character を有効にする。



図6 XBeeRF モジュールの外観

3.5 サーバサイドアプリケーションの開発

サーバサイドアプリケーションの開発にはプログラミング言語 Python (*1) を用いた。

開発したアプリケーションの機能は主に以下の2つからなる。

- サーバに接続された ZigBee コーディネータから、データ取得時刻、ZigBee エンドデバイス又はルータのアドレス、消費電力等のデータを取得し SQLite データベース (*2) に保存。XBeeRF モジュールへのアクセスには xbee-python ライブラリ (*3) を利用した。なお、コーディネータが壊れたパケットを受け取ることでサーバサイドアプリケーションが停止する恐れがあるため、プログラムには壊れたパケットを自動的に破棄する手続きを加えている。
- SQLite データベースからグラフ化するために必要な JSON ファイル (JavaScript Object Notation の略で、テキストベースの軽量データ交換) (*4) を生成。JSON ファイルは HTML 文書から JavaScript で読み込み、Flash でグラフを描画するためのライブラリである Open Flash Chart2 (*5) を用いてグラフ化を行った。

以上、Apache や Black Jumbo Dog 等の Web サーバを立ち上げることで、ネットワークに接続された PC の Web ブラウザを通して消費電力等に関するグラフを閲覧することができる。なお、Flash を閲覧するためには別途 Adobe Flash Player (*8) のインストールが必要である。

- (*1) <http://python.org/>
- (*2) <http://www.sqlite.org/>
- (*3) <http://code.google.com/p/python-xbee/>
- (*4) <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4627.txt>
- (*5) <http://teethgrinder.co.uk/open-flash-chart-2/>
- (*6) <http://httpd.apache.org/>
- (*7) <http://www.spw02.sakura.ne.jp/spw/bjd/>
- (*8) <http://get.adobe.com/jp/flashplayer/>

4. 研究結果と考察

開発した消費電力見える化システムから取得したグラフ及びを実際に設置した様子をそれぞれ図7～図9に示す。

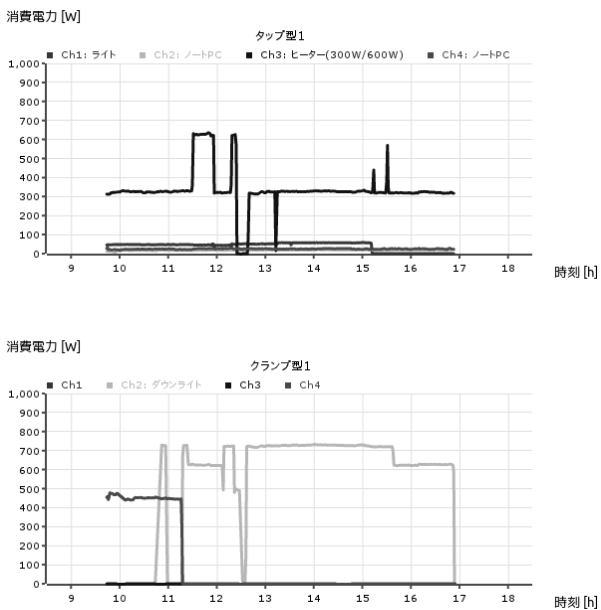


図7 電力見える化システムから取得したグラフ



図8 タップ式電力センサモジュールの設置状況

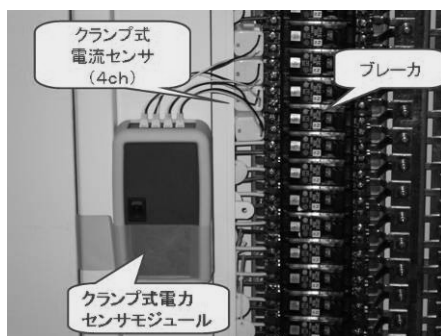


図9 クランプ式電力センサモジュールの設置状況

図7 上図はタップ式電力センサモジュールから取得したデータ、下図はクランプ式電力センサモジュールから取得したデータをグラフ化したものである。ここでタップ式電力センサモジュールは卓上ライト、ヒーター(300W/600W)、ノートPC2台に、クランプ式電力センサモジュールは分電盤に設置されているブレーカ4台の2次側1線にそれぞれ接続されている。

システムを設置するにあたり、XBeeRFモジュールのエンドデバイスとコーディネータ間に壁や扉の金属遮蔽物がある場合やモジュール間の距離がある距離以上になった場合に無線通信が途切れることがあった。(データシートによると本システムに使用したXBeeRFモ

ジュールのアーバンレンジは最大40m、見通しレンジは最大120m程) 来年度以降、工場等での実証実験を予定しているが、このような通信障害が発生した場合は、エンドデバイスとコーディネータの間にいくつかのルータを配置する等の対策が必要になってくると考えられる。

5. まとめ

PICマイコン、無線モジュールXBee、クランプ式電流センサ、ホール効果センサIC等を用いてクランプ式及びタップ式電力センサモジュールを開発し、無線通信規格 ZigBee を用いて電力センサモジュールをノードとしたセンサネットワークシステムを構築した。

また、サーバーサイドアプリケーションとして、ZigBee コーディネータからデータを取得し SQLite データベースに保存するプログラム、SQLite データベースからグラフ化に必要な JSON ファイルを生成するプログラムを作成した。なお、JSON形式のデータファイルはグラフ作成ライブラリ Open Flash Chart によりグラフ化することで、ネットワークに接続された PC の Web ブラウザから閲覧できるようになっている。

以上により、分電盤内の各系統やコンセントに接続される電気機器の消費電力を簡易的に見える化できるシステムを実現することができた。

6. 今後の課題

来年度以降、本調査研究で開発したシステムを当センターに設置することで実証実験を行うとともに、特に工場等への導入を図ることで省エネルギー診断等に活用していく予定である。それに伴う課題として、次のようなことがあげられる。

- ・電力センサモジュールの三相電源対応
- ・電力センサモジュールの省電力化
- ・電力測定精度の向上
- ・量産に向けた専用プリント基板の作成
- ・温度、照度等センシング可能な物理量の多様化
- ・システム利用者に応じたソフトウェアアプリケーションの開発
- ・広範囲にわたる無線通信ネットワークの無線通信性能評価
- ・電力見える化の結果を活用した付加システムの開発 (照明や空調等の自動制御や消費電力推移予測等)

また、本調査研究で利用した技術は、生産現場のデータ収集、農場や農業ハウス内の環境管理等様々な応用が考えられる。今後諸分野への技術移転を図ってきたい。

6. 謝辞

本調査研究にあたり、有意義なご助言をいただいた独立行政法人産業技術総合研究所情報技術研究部門スマートグリッド研究グループ、山形県工業技術センター電子情報技術部情報研究科、栃木県産業技術センター機械電子技術部電子応用研究室の皆様にご感謝いたします。