

AC 電源周波数センサーを備えた家電制御デバイスとそのソーシャル Web 上の運用による電力需用者側による電源周波数調整について

山崎重一郎^{†1}

電力はほとんど貯蔵できないため、電力事業者は電力の需要と供給が常に同量になるよう発電量を制御している。電力の需給のバランスのずれは発電機のトルク負荷の変動として作用し AC 電源の周波数を変動させるため、電源周波数調整力も電力事業者が提供する「電力供給サービス」の一つになっている。本研究の目的は、需用者側が AC 電源の周波数変動を検知することによって、電源周波数調整力のみでの発電サービス供給に参加できる方法を提案することである。この目的のために、我々は AC 電源周波数の変動を検知する安価なセンサー装置を開発した。この装置の効果を検証するために、九州の 7 都市に設置し約 3 ヶ月にわたって AC 電源の周波数変動を測定した。この実験の結果、すべての都市の AC 電源周波数の変動が正確に同期していることが確認できた。この結果を受けて、我々はこのデバイスに需給状況表示用の LED と赤外線 LED を追加することによって、周波数変動に反応して、人の節電行動を促したりエアコンの出力を制御したりする機能を追加した。本稿では、この装置による電源周波数調整力についても議論を行う。また、この装置の所有者コミュニティのソーシャルな協調行動によって、「仮想発電所」を構成する案についても議論する。

An Electric Power Balancing Control by the Air-Conditioner Controller with AC Power Frequency Sensor over the Social-Web

SHIGEICHIRO YAMASAKI^{†1}

1. 背景と目的

電力事業者が提供する主要な「電力供給サービス」には、電力そのものの供給に加えて、「電力余力供給」と「電源周波数調整力供給」の 3 種がある。電力余力供給とは、電力需要の増加による停電発生の確率を最小化するというサービスであり、電源周波数調整力は急激な電力需要変動に対する需要と供給のバランスの調整を常時実施できる能力である。

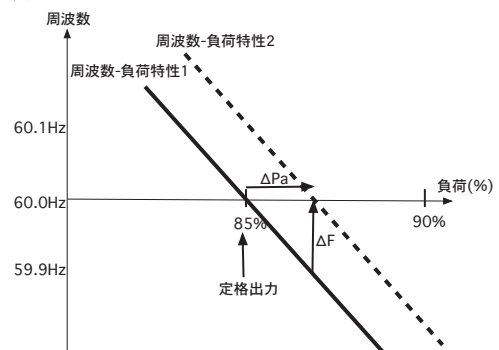
本研究の目的は、AC 電源の周波数変動から広域的な電力需給バランスをリアルタイムで検知できるソーシャルデバイスにより、電力需用者側の集団的な電力利用行動を引き出すことによって、電源周波数調整力の供給を行う手段を構成することである。

1.1 電力需給バランスと AC 電源周波数変動の関係

電力網における電力の需要と供給は常に双方が同量になるよう制御しなければならない。電力はほとんどためることができないため、この関係は大規模な電力網においても常に監視され維持される必要がある。また、電源周波数の安定化そのものが電源品質の重要な要素である。日本の電力事業者は東日本では 50Hz、西日本では 60Hz の標準周波数からの変動を絶対値で 0.2Hz~0.3Hz 以内に調整してお

り、これは電気事業法に定められた義務でもある。この電源周波数が基準を超えて大きく変動すると、工場で生産される製品の品質などに影響が出るだけでなく、発電機そのものへの重大な影響が連鎖的に発生し、大規模な停電を引き起こす可能性もある。

電力の需給バランスは AC 電源の周波数の標準値からの変動を調べることによってリアルタイムに知ることができる。電力需要が増加すると発電機のトルクが増加し、AC 電源周波数は減少側に変位する。また電力需要が減少すると発電機のトルクも減少するため、電源 AC 周波数は増加側に変位する。図 1 は、電源周波数と負荷の関係である。発電機が定格出力に設定されているとき、負荷が増加すると周波数が低下したところで安定する。その状況で周波数を標準に戻すためには発電機の出力そのものを増加させ周波数負荷特性を修正する必要がある。



^{†1} 近畿大学

図 1 周波数負荷特性と負荷調整

1.2 風力発電や太陽光発電の増加と電源周波数変動

風力発電や太陽光発電による発電出力は、自然環境に影響されるため不安定である。このため、電力網全体における電力需給バランスの維持をより困難にするという問題がある。特に太陽光発電は大きな慣性系を持たないため、天候などの要因で出力が激しく変動する。図 1 は、九州電力のある日の太陽光発電の一日の出力である。

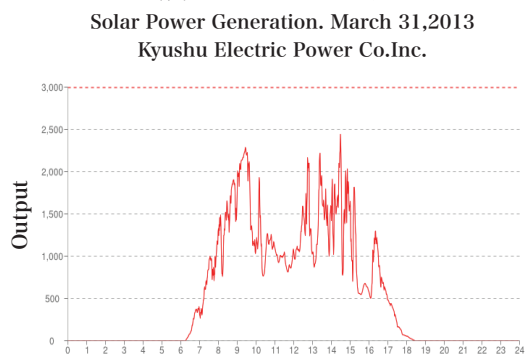


図 2 太陽光発電の 1 日の出力変動の例

この問題に対する一般的な対策は、太陽光発電設備を増設するときには、出力制御が容易な火力発電も併せて増設することである。しかしこれは再生可能エネルギーによる燃料とコスト削減という観点からはジレンマである。また、大規模な発電所の出力を電池などに蓄電して安定化する方法は莫大なコストが必要となる。

1.3 スマートグリッドと需用者側の節電行動

日本国内では、電力の同量制御は電力事業者による中央給電司令所を中核とする電力網と出力制御が可能な発電機群の垂直統合型の管理によって実現されている。このような垂直統合型の集中管理型システムは、電力自由化や発送電分離のトレンドとは整合性が乏しく世界標準技術とも方向性が異なる。電力需給を安定化させる手段のひとつとして供給者側のみではなく需用者側も協力的に行動する「デマンド・レスポンス」の実現が期待されている。これと関連してスマートグリッドやスマートメータは、電力の逼迫度に応じて電気料金を変化させ、時間帯に応じた節電行動のインセンティブを与えることを目的にしている。しかし、スマートグリッドには技術面でも標準化の面でもインフラの整備の面でも解決すべき課題が多数存在し実現にはまだ時間が必要である。本研究の主題は、需用者側が電力需給の同量制御に参加する「デマンド・レスポンス」を非常に安価なデバイスの導入のみによっても一部ではあるが実現可能であることを検証することである。

2. 安価な AC 電源周波数センサー装置

2.1 AC 電源周波数センサーとしてのアンテナ

我々が開発した装置の中核は下図のような 7.4cm の銅線によるアンテナである。これは非常に安価な AC 電源周波

数のセンサーになる。家庭やオフィスにはいたるところに AC 電源の配線があるため、このような簡易的なアンテナでも十分に機能することが実験の結果わかった。



図 3 AC 電源周波数センサーアンテナ

2.2 AC 電源周波数センサーデバイスの実装

我々は、安価なマザーボードである BeagleBone を用いて AC 電源周波数センサーを実装した。Beagle Bone は TI 社が開発したクレジットカードサイズの Linux ボードである。アンテナの実装方法は、下図のように上記の銅線を BeagleBone のアナログポートに接続してその電圧を 5 ミリ秒毎にサンプリングするという簡単なものである。

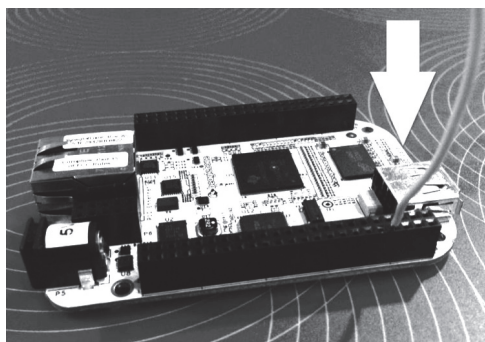


図 4 アナログポートにアンテナを接続した BeagleBone

我々の実装では、25 秒間隔で測定したアナログポート電圧のデータ系列を高速フーリエ変換によって離散スペクトルに変換し、最も密度が高いスペクトルをその時点での AC 電源周波数としている。またこのデータは HTTP プロトコルでサーバに送信し、データベースに保存し集計するようにした。実装言語には Ruby を用い、Ruby における reactive パターンの実装ライブラリである eventmachine を利用して時区間駆動でサンプリングを行った。

3. 九州 7 都市における AC 電源周波数測定実験

我々は、開発した AC 周波数センサー装置を九州の 7 都市（大分市、福岡市、長崎市、飯塚市、筑紫野市、唐津市、久留米市）に設置し、3 ヶ月にわたって測定を行った。次の図は、九州の主要な発電所、送電網と AC 周波数センサー装置の設置場所である。実験参加者はソーシャル Web の一つである facebook のグループによって情報やコミュニケーションを行った。また、AC 周波数センサー装置からの周波数データを集約するデータベースサーバでは、Web によって周波数変動の記録を直前 3 時間区間と直前 30 分区間でリアルタイムにグラフ表示するシステムも開発した。また、この情報と同期して、九州電力が公開している 5 分

間隔での電力使用状況のグラフ表示させた。

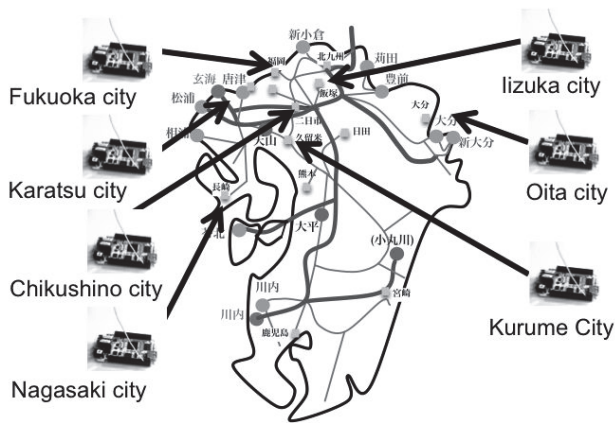


図 5 九州の主要な発電所、送電網と実験装置の設置場所

家屋やオフィスのいたるところに電源の配線は存在しているので、AC 電源周波数センサー装置の設置は特別な場所である必要はなく、基本的に家屋やオフィスの中の任意の場所にネットワークケーブルと電源を接続するだけで十分であった。



図 6 実験に用いた AC 電源周波数センサーの設置例

この実験は、2012 年 12 月 25 日から 2013 年 3 月 31 日まで実施した。

3.1 測定した全都市の AC 電源周波数変動の同期

実験の結果、全都市の AC 電源周波数変動が全ての時間帯で誤差の範囲内ではほぼ正確に同期していることを確認した。下図は、測定した AC 電源周波数変動の 2013 年 1 月 22 日の 12 時 14 分における直前 3 時間の各都市の AC 電源周波数変動のグラフである。

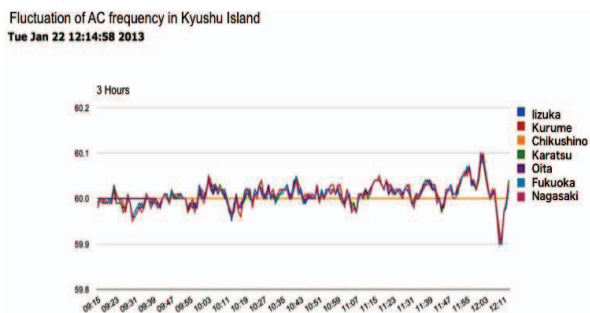


図 7 直前 3 時間の九州 7 都市の電源周波数変動の例
このグラフでも 7 都市のすべての AC 電源周波数の変動が重なっていることが確認することができる。また図 8 と図 9 は、2013 年 2 月 1 日（金曜）午前 0 時から 2 月 8 日（金曜）午前 0 時まで 1 週間の電源周波数変動に関する都市間の標本相互相関のグラフである。

Sample Cross Correlaton of Nagasaki and Fukuoka

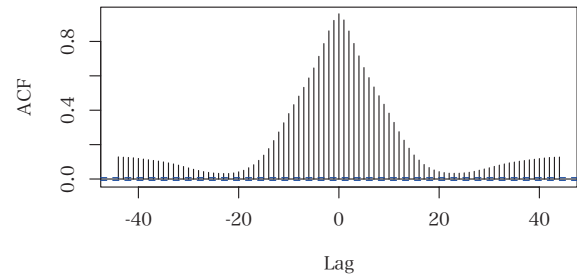


図 8 長崎市と福岡市の周波数変動の標本相互相関

Sample Cross Correlaton of Iizuka and Fukuoka

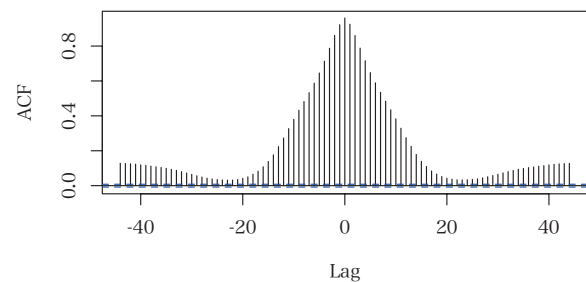


図 9 飯塚市と福岡市の周波数変動の標本相互相関

このグラフから、距離的に離れた場所にある都市においても、時差 0 における相関が 1.0 に近い非常に強い相関があることがわかる。つまり九州の中の都市における電源周波数の変動は、ほぼ完全に都市間で同期していると言えることができる。

すでに述べたように、AC 電源周波数変動は、電力需給バランスの状態をリアルタイムで示す指標として利用できる。したがって、この実験結果により、我々が開発したセンサーは、九州のどの都市に設置したものであっても、そのセンサーが検知した AC 電源周波数変動によって九州全域における電力需給バランスをリアルタイムで知る手段となる。

3.2 AC 電源周波数変動に連動したエアコンの出力制御機能の追加

この実験結果を受けて、我々は開発した装置の PWM ポートに赤外線 LED を追加した。その理由は、赤外線 LED をエアコンのリモコンの機能を模倣させることであり、この機能追加により我々の装置はオフィスや家庭内のエアコンの出力を電源周波数の変動に応じて、リアルタイムに制

御できるようになった。

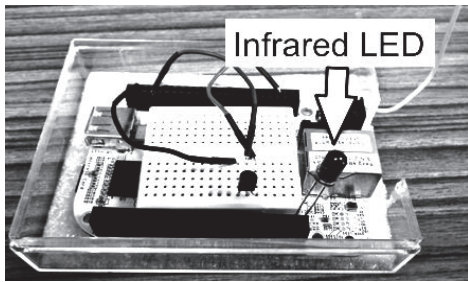


図 10 BeagleBone の PWM ポートに赤外線 LED を追加

もし我々の装置が九州中のオフィスや家庭に設置されれば、九州中の電力需給バランスに応じて、九州中のエアコンの出力を即座にコントロールすることが可能になる。

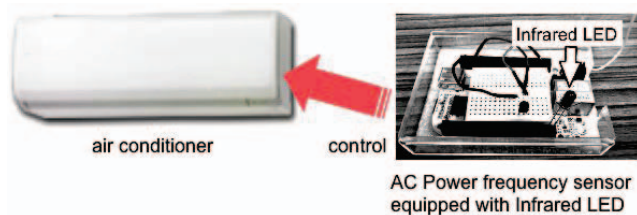


図 11 赤外線 LED の追加によるエアコンの制御

3.3 エアコンの制御による消費電力の変化

図 12 は、エアコンの電源 ON と OFF による家庭の電力消費量の変化を測定したものである。2001 年製造の旧式のエアコンと 2006 年製造のもの 2 機種で測定した。古い機種では、1500W の違いが出たが 2006 年製造のものは 500W 程度であった。電源 OFF による出力の減少は 1 分以内に完了したが、電源 ON による消費電力の増加には旧機種では数分、2006 年製造のものでも 2 分程度必要であった。

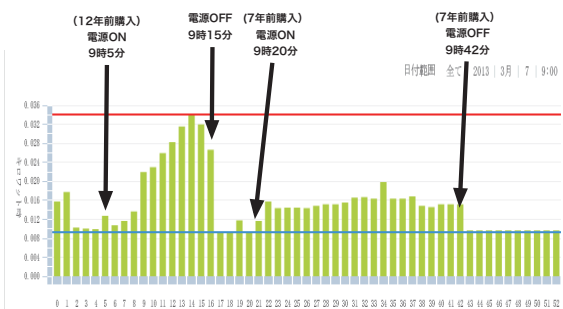


図 12 エアコンの制御により消費電力の変化

4. ソーシャルデバイスによる周波数調整力を供給する「仮想発電所」の提案

4.1 登録制のソーシャルデバイス

ソーシャルデバイスの典型例として、無線 LAN 装置の相互利用を目的とした Fon を挙げることができる。Fon では、無線 LAN 購入者がプライベートな無線ネットワークの一部を共有サービスとして近隣に開放していることを利

用者登録と運用状況の公開によってソーシャルデバイスの価値を高めている。

我々は開発したエアコン制御機能を備えた AC 電源周波数センサー装置を Fon などと同様の登録制のソーシャルデバイスとしようとしている。

4.2 ソーシャル Web によるコミュニティの形成

登録制のソーシャルデバイスにする目的は、この装置を単に導入するだけでなく、導入後の運用を継続的にコミュニティの参加者として維持することで効果を出すことである。そのためには、ソーシャル Web によるコミュニティの形成が重要であると考えている。コミュニティメンバーのリアルタイムでの節電行動などのノウハウの共有やソーシャルな伝播なども期待できる。

これに関連して、コミュニティ参加者の行動をより効果的に収集するための表示デバイスとセンサーの追加も検討をすすめている。

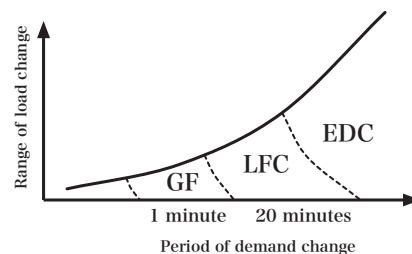
4.3 地域電気マナーによるインセンティブの付与

地域電気マナーは国立情報学研究所の岡田仁志氏が考案し開発を進めている需要者側の電力の効率的な利用にインセンティブを与えることを目的とした地域通貨の一種である。

多くの需要者にとって、節電がよい行動であることはわかりやすいが、実際の電力需給変動に対しては、むしろ需要を増やした方がよい場合もあるということは理解が難しい。このような困難を地域電気マナーのポイントを得る方法として単純化し、インセンティブを与えることによってコミュニティの参加者の行動をより集約しやすくする効果が期待できる。

4.4 AC 電源周波数制御の分類

日本の AC 電源の基本周波数は西日本では 60Hz、東日本では 50Hz であり、この基本周波数からの偏差が 0.2Hz 以内に納まるように制御されている。この制御は主に火力発電によって実施されている。その理由は他の発電方式に比べて出力の制御が容易であるからである。



GF: Governor Free
LFC: Load Frequency Control
EDC: Economic Dispatching Control

図 13 調整周期と負荷変動量に基づく周波数制御方式の分類

発電機のタービンは、1分から5分程度の変動については、ガバナフリーと呼ばれる制御がおこなれる。5分から20分

程度の変動は実際の電力需要負荷に基づく LFC（負荷周波数制御）と呼ばれる制御が行われる。さらに 20 分以上の変動については、発電所や発電方式を燃費や経済効率性の観点から最適な比率に配置する制御である。

4.5 「発電所」としての LFC 調整力とその価値

LFC 容量の供給は電力自体の供給と同様の発電事業者が提供するサービスの一つであり、電力卸売り市場で取引される商品の一つでもある。下図は、火力発電における発電出力と実際の LFC 供給容量の幅である。

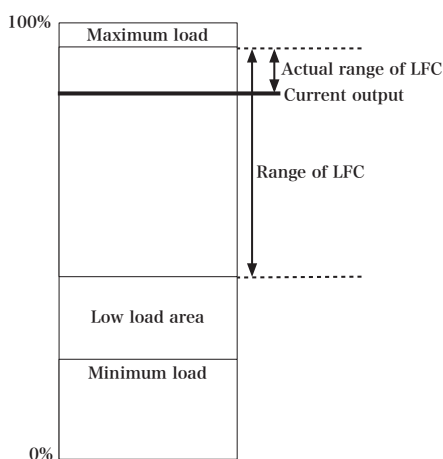


図 14 火力発電の出力に対する実際の LFC 容量

図から明らかなように、その時点における発電出力が発電上限に近づくにつれて、LFC 容量は減少する。これはすなわち、電力需要が供給量の上限に近づくにしたがって LFC の市場価値が高まることになる。

4.6 LFC 供給力を提供する需用者側の節電行動による「仮想発電所」

もし全発電システムが十分な LFC 容量を持っていれば、火力発電は燃費が最良の負荷レベルで運転することができるため燃料の消費コストを減らすことができる。したがって、需用者側の節電行動を集約することで LFC 容量を提供することは合理性を持つ。我々は、これを「仮想発電所」と呼んでいる。

99%の時間帯で周波数の偏差を 0.1Hz 以内に納めるために必要な LFC 供給に必要な容量は、全発電容量の 1%とされている。九州電力のピーク時の発電容量は 12GW 程度なので、九州全体で必要となる LFC 容量は 120MW 程度だと考えることができる。

サンプル数が少ないため正確な見積もりとは言えないが、上記で述べたように 1 台のエアコンのオンオフ制御によって 5 分以内に増減可能な消費電力は 500W 程度あるいはそれ以上であると見積もることができるであろう。これを前提にすると、10000 台で 5MW となる。これは電力容量としては非常に小さく、電力需要に影響を与えるものとは理解しにくい、5 分以内という短時間に即座に組織的に反応することができるという特性があるため、九州全体の

LFC 容量の 4%を供給することが可能であることがわかる。特に、火力発電所の発電負荷がピークになる真夏の午後 2 時ごろを考えると、負荷 100%に近いところで発電量を増加させようとする代わりに需要側が需要を減少させる行動をとることは有意な効果を生む可能性が高い。

4.7 過去の周波数変動からの予測制御

過去の周期性を持つ時系列データから周波数変動を予測することは、AR 分析などの時系列解析を使うことによって実現可能である。下図は、3600 秒間の周波数変動の差分の時系列データとその後 300 秒までの周波数変動の予測値である。

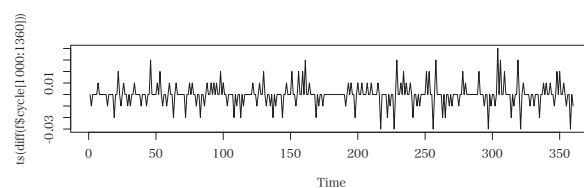


図 15 3600 秒間の周波数変動の差分

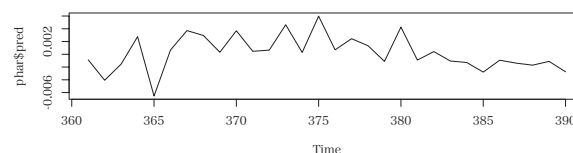


図 16 300 秒後までの周波数変動の予測

我々はこのアプローチで効果的な周波数変動からの電力消費行動の取り方を調査している。

5. まとめ

本研究による仮想発電所は、既存のインフラと既存のエアコンなどの家電に安価なソーシャルデバイスを設置するだけで実現可能な現実的のものである。しかし、その効率的な運用方法や規模に対する効果などはまだ把握できていない。今後、より正確なシミュレーションや実験によって周波数調整力の性能の向上と規模に対する効果のより正確な見積もりができるようにしたい。

参考文献

- 1) P. Kunder: Power System Stability and Control, McGraw-Hill (1994)
- 2) Beagle Bone: What is BeagleBone?, <http://beagleboard.org/Products/BeagleBone>
- 3) 宅間薫, 垣本直人: 電力工学, 共立出版, ISBN 4-320-08584, 2002 年
- 4) Fon: fon, <http://www.fon.ne.jp>
- 5) 山本要一, 池田元英: よくわかる電力取引入門, エネルギーフォーラム, ISBN978-4-88555-356-1, 2008 年
- 6) 北川源四郎: 時系列解析入門, 岩波書店, ISBN4-00-005455-4, 2012 年