

プロトコル階層を持つ家庭内オンデマンド 電力管理システムの設計と実装

前田朋孝^{†1} 岡本暁広^{†2} 小山洋一^{†2} 中野博樹^{†2}
星野寛^{†2} 村上伸太郎^{†3} 森本尚之^{†4} 坂井一美^{†1} 岡部寿男^{†1}

本研究では生活の質をなるべく下げることなく確実に節電を実現するために、機器が必要な電力要求を電源に対して行ったのち電源から機器に対して電力要求に基づいた割り当てを行うことが可能なオンデマンド電力管理システム (Energy on Demand: EoD) を、要求/応答層・経路制御層・物理層の3層からなるプロトコル階層を持たせて設計および実装を行った。プロトコル階層をわけることにより、電力要求と応答・電力フローの設定・実際の送電を個別に対応できることから、設計したオンデマンド電力管理システムは柔軟に拡張することが可能となる。本稿では、単一の家庭を対象とした優先度に基づく家庭内オンデマンド電力管理システムについて述べるとともに、設計したシステムを実装した実証実験により生活の質をなるべく下げることなく確実に節電を実現できることを示す。

Design and Implementation of An On-Demand Home Power Management System with the Protocol Hierarchy

Tomotaka Maeda^{†1} Akihiro Okamoto^{†2} Youichi Koyama^{†2} Hiroki Nakano^{†2}
Hiroshi Hoshino^{†2} Shintaro Murakami^{†3} Naoyuki Morimoto^{†4}
Kazumi Sakai^{†1} Yasuo Okabe^{†1}

We design and implement an On-Demand home power management system to save power reliably without reducing the Quality of Life as much as possible. The protocol hierarchy consists of a layer of Request / response layer, Path control layer, and Physical layer. By separating the protocol hierarchy, it is possible to treat response and power requirements, power flow setting, and power transmission. Therefore On-demand power management system can be flexibly expanded. In this paper, we describe on-demand single home power management system based on the priority, and indicate to save power reliably without reducing the Quality of Life as much as possible by performing the demonstration experiments that hat introduced implementation of our designed system.

1. はじめに

近年わが国において 2011 年の 3 月に起きた東日本大震災やそれに続く原発事故などの影響により電力の需要と供給のバランスが崩れ、電力供給力不足による停電の回避のために計画停電が実施される事態となった。さらに、夏や冬においては需要が大幅に増加することから電力使用量の削減が必要となる。この問題に対処するため、わが国では現在、夏や冬の電力需要が増大する時期には、工業地や商業地だけでなく、一般家庭に対しても、節電要請やピーク削減要請が出されている。個々の一般家庭における省エネのためのシステムとして HEMS (Home Energy Management System) [1][2] と呼ばれるシステムが研究開発されている。HEMS は家庭設備の遠隔制御・自動制御から発展してきた技術であり、そこから家庭内の電力利用量や電気料金などの「見える化」を可能にすることによる生活者への注意喚起や温度・湿度などのセンサ類からの情報による照明の調光を行うことにより省エネを促進することが可能である。

しかし現在の電力供給網においては、家電機器がコンセントに接続した場合に必要な電力を無条件に供給してしまうことから、生活者が各家電機器の消費電力を抑えるための努力を行わなくてはならず、また節電目標を達成できることも限らない。

その解決方法として、生活者が意識することなく自動的に各家電機器の消費電力を抑制することが必要となる。松山らが提唱するエネルギーの情報化[3]では、オンデマンド型電力供給 (Energy on Demand; EoD) を提唱している。EoD では、電力を要求するメッセージを電源に対して送信し、供給可能な電力や電気機器の優先度などに基づく調停によって電力供給の可否や供給可能電力を電気機器に割り当てを行うことが可能となる。これにより目標値まで家全体の電力を抑制することを期待できる。しかし、これまで EoD システムではすべてのシステムが一体として実装されていたため、異なる電力要求と応答を用いたシステム (例えば交流のルールシステムから直流のルールシステムに変更するなど) にすることは困難であった。

^{†1} 京都大学 学術情報メディアセンター
Kyoto University Academic Center for Computing and Media Studies

^{†2} (株) トランス・ニュー・テクノロジー
Trans New Technology, Inc. (TNT)

^{†3} 大和ハウス工業(株)
Daiwa House Industry Co., Ltd.

^{†4} (株) エネゲート
Enegate Co., Ltd.

そこで本研究では EoD システムを、要求/応答層・経路制御層・物理層の3層からなるプロトコル階層を持たせて設計を行った。プロトコル階層をわけることにより、電力要求と応答・電力フローの設定・実際の送電を個別に対応することにより柔軟な拡張性を持たせている。また、機器の分散システム化を行うことにより、途中で使用する家電や電源が増えた場合においても停止することなく動かせるシステムとなっている。この設計に基づき実装を行い、実際に生活の質 (Quality of Life: QoL) をなるべく下げることなく確実に節電を実現することが可能となることを、実証実験を行うことにより示した。

以下2章において本研究の基本思想であるオンデマンド型電力供給について述べる。EoD プロトコルの三階層設計について3章で述べる。4章では前章の設計に基づいて作成された実装を述べ、5章でその実装を用いた実証実験の状況について述べる。最後に6章においてまとめと今後の課題について触れる。

2. オンデマンド型電力供給

現在家庭において使用されている電力網において、外部からの電力は分電盤において引き込まれ集中管理されている。また、家電機器はコンセントより個々の機器が必要とする電力を無条件に消費してしまう。そのため、コンセントに接続された機器の消費電力が分電盤の定めるブレーカ容量を超えてしまった場合、ブレーカが落ちるということがしばしば起こる。

これは個々の機器が必要とする電力を無条件に消費してしまうことにより起こることから、機器が無条件に電気が消費するのではなく、管理された分量だけ消費できるようにすれば解決することができる。そのためには、機器が電力の需要を電源に対して申告し、割り当てが可能であれば電力の消費を行うようにしなくてはならない。

エネルギーの情報化ワーキンググループにおいては、電源と機器間においてエネルギーのやり取りだけでなく情報のやり取りも行うことにより、エネルギーの流れを情報で管理することで、エネルギーの流れや変化を可視化するとともに、EoD に基づいたエネルギーの蓄積・制御についても考えられている。そうすることにより節電を達成することを目指している。

松山らは、一定期間に使用する積算電力量の上限値を決めることにより電力使用計画を立て、EoD に基づいて機器から要求された電力と優先度を元に電力の割り当てを行うことにより生活の質をなるべく落とさずに節電を行う節電率保証付き節電システム[4]を提案している。

対して我々は ICE-IT[5]プロジェクトにおいて、EoD に基づいて機器から要求された電力と優先度を元に電力の割り当てをするプロセスを電力要求/応答層・経路制御層・物理層の三層構造を持たせて設計[6]することにより、電力要求

と応答・電力フローの設定・実際の送電を個別に対応することが可能となる。さらに瞬時電力量に注目して電力の割り当てを行うことにより、機器の状態が持つ優先度を考慮に入れつつ確実に電力を削減することが可能となる。[7]

3. ICE-IT オンデマンド型電力供給の詳細設計

本節において ICE-IT におけるオンデマンド型電力供給について述べる。

3.1 ICE-IT オンデマンド型電力供給の全体構成

我々の想定する標準的なオンデマンド型電力供給を構成要素は EoD 対応家電と EoD に対応した電源、電源と EoD 対応家電をつなぐ電力ルータそしてホームゲートウェイである。これらの機器が網を形成しているものを想定している。

また、ICE-IT におけるオンデマンド型電力供給では、単一の電源から電力の供給が行われるのではなく、複数の電源から電力の供給を受けることを想定に入れている。これを行うために、EoD 対応家電は複数の電源に対して電力の要求を出し、帰ってきた結果の中でもっとも条件の良いものに対して電力の割り当ててもらわなくてはならない。そのため、EoD 対応家電からの要求を受け入れるかどうかの判断は各電源において行われる。そのため、電源や EoD 対応家電が増減した場合についても、システムが途中で止まることなく動き続けることが可能となる。これは我々の提案するシステムが分散システム化しているためである。

しかし、家電の電気の使用状況等を可視化するために必要なデータの収集を行っているホームゲートウェイについて集中型となっている。

3.2 三層構造の必要性

本研究では、システムの柔軟性を確保するため、機器が環境情報を判断してどのような電力の受信・送信をすれば良いか判断する要求/応答層、EoD プロトコルをやりとりして送受信する電力とその経路を決定する経路制御層、物理的な送電を担う物理層の三層からなる図1のような階層構造を設計した。

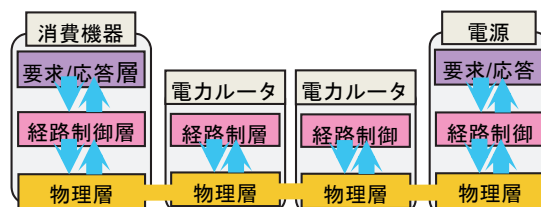


図1 三層構造モデル

Figure 1 Three-layer structure model

この設計により、様々な方針の電力送受信が可能になり、また様々な形式の送電網に対応できる。実際、後述の EoD 対応家電のルールシステムと後追い EoD のルールシステムは異なるものを利用しており、送電方式も従来の家庭内配線の他にエネゲート製電力切替器にも対応できている。

この三層構造において経路制御層は EoD を使う上で欠かせないことからアワーグラスモデルとなっており、要求/応答層プロトコルや物理層のプロトコルを入れ替えることで柔軟に対応することが可能となる。

3.3 要求/応答層

要求/応答層は機器が環境情報を判断してどのような電力の受信・送信をすれば良いか判断を行う。

この層においてはデータベースに蓄積された過去の消費状況や当日のさまざまなセンサ情報に基づき、機器の要求につける優先度の決定と、電源の電力供給量（瞬時電力値）の決定を行う。

前者は生活者の QoL をなるべく維持できるように調整し、後者は一日の中での需要変動を予測しつつ一日全体での積算電力の削減目標を達成できるように調整する。

3.4 経路制御層

経路制御層では消費機器および電力間の電力網の把握および電力網のグラフ構造の把握、電源と機器の間の送電経路を決定および確保を行う。

この層においては機器と電力ルータ間および電力ルータ同士間の接続関係や容量（通信であれば帯域幅、電力網では許容電力の値）の状態を網内で交換および収集を行った後、電力の要求が発生した時にその旨を網に伝えて必要な経路の設定・確保が行われる。

電力供給量を超えてしまった場合は、優先度の高い機器を優先して要求を満たすために、優先度の低い機器に既に設定・確保されている電力配送を中断して高い優先度の機器のために電力や送電経路を確保しなおす「奪い取り」が行われる[8]。この際奪い取られる側の機器は、動作モードを強から弱に切り替えるなどにより少ない電力で動作が可能である場合、より電力の少ない電力要求により電力や送電経路を確保しなおす。

3.5 物理層

物理層は経路制御層での経路の送電を実際に行う。このとき用いられる電力網に使用される電力は交流だけでなく直流を用いることも想定に入っている。この場合、異なる物理ルータを用いることになる。既に提案されている方法としては、Power over Ethernet (PoE) 方式を応用した直流ルータ[9]と、交流 100V を扱う交流ルータ[10]があり、さらに直流をパケット化して扱う直流ルータも研究されている[11][12]。また、既存の家庭内で既存の家電機器を扱いつつ EoD プロトコルに対応するために、電力ルータと末端の消費機器の役割を合わせて担当する「スマートタップ」も開発されている[13]。

さらに、各家電における電力の計測値をホームサーバ等に報告しデータベースへ蓄積も行っている。

4. 実装

4.1 ハードウェア

本システムの実装にあたり、電力制御機能を持つ電源タップである「スマートタップ」[13]を用いた。このスマートタップはルールベース電力制御を念頭に設計されており、4 つのコンセントをそれぞれオン・オフ制御するためのリレー、コンセントごとの瞬時電力、積算電力、電圧、電流の計測機能、そして USB インタフェース付きの ARM ベースコンピュータ (Armadillo 440, アットマークテクノ社製) を搭載している。高い頻度でのデータ収集と一般的な情報機器との連携を容易にするため、通信媒体として Wi-Fi (IEEE802.11n, 2.4GHz) インタフェースを持つ。OS として組込み用 Linux が動作しており、その上に後述する EoD プロトコルを実装することでシステム開発を行った。

4.2 プロトコル

4.2.1 要求/応答層の実装

(1) ルールシステムによるルール配信

EoD システムにおいては、機器の操作に際し、環境情報を総合的に判断して適切な電力要求を生成する「ルール」と呼ばれるシステムを用いる。

ルールシステムで使用するルールとして、塚本ら[14]はグローバルメタルール・グローバルルール・ローカルルールを定義している。これらのルールの詳細を述べると、グローバルメタルールが制御電力削減の方針であり、グローバルルールはグローバルメタルールと電力の機器情報から具体的な電力要求について示したもの、さらにローカルルールが個々の機器においてどのような動作を行うかを示したものである。

これらのルールを用いることにより、電力を抑制するべき瞬時電力を与えることで変換された機器の要求する電力および優先度を要求するべきかを各機器が知ることが可能となる。

また、ローカルルールでは個々の機器が現在どのようなモードで動いているかを知っているということを前提として与えられている。しかし、後述の後追い EoD ではその前提が満たされていないため、機器の電力使用の履歴を用いて機器のモードを判断し適切な電力要求を生成するルールを開発し、それを用いてシステムの構築を行った。

(2) EoD 対応家電による電力要求

家電の発生すべき要求は、家電がもともと持っている動作制御機構に合わせて発生されるべきである。これには、生活者の操作に基づく動作モードの変更以外に、温度調節機能など家電自身が自動的に制御するものを含んでいる。後者については家電の内部機構に立ち入った改造が必要となるため今回は除外して検討し、単に生活者の操作部分を置き換えることで EoD プロトコルのやりとりができるように改造した。具体的には、市販の掃除機・エアコン・ヒ

ーターなどの家電について、その入力機構(スイッチ・ボタン)などを EoD 対応コントローラに置き換えた。

このような改造家電 (EoD 対応家電) では、生活者が EoD 対応コントローラで操作をすると、まず電力網に向けて電力要求を送信し、要求が満たされた場合には家電本来のコントロール部に対して信号を送って動作モードを変更する。単一の操作に対して複数の希望をリストにした電力要求を出すことにより、要求したとおりの電力が得られない場合にも次善の動作モードでの電力が得られればそれに応じた信号を送ることができる。いずれの希望も満たされなければ動作停止の信号を送る。

また、EoD 対応家電は電力要求を定期的に出しなおす。これにより、優先度の高い機器の稼働が終了したことで電力に余裕ができれば、生活者の操作を待つことなく動作モードを変更することができる。また逆に、優先度の高い機器が後から動作を開始したことにより電力が不足した場合にも自動的に動作モードが変化する (電力の奪い取り動作)。

このようにして、例えばエアコン(優先度: 高)と掃除機(優先度: 低)の同時稼働において「掃除機はエアコンがあまり電力を使っていないときだけ『強』に、エアコンが大電力を使っている場合は(生活者が強にしても)『中』にする」という制御が可能となり、「エアコンの操作をするだけで掃除機が適切動作モードを自動的に選択する」という動作を実現した。

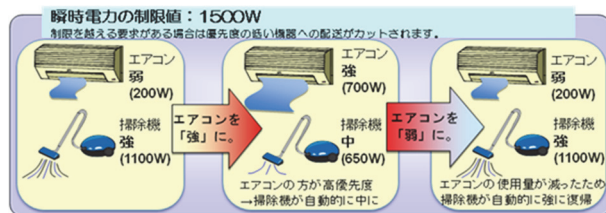


図 2 EoD 対応家電

Figure 2 EoD corresponding consumer electronics

(3) 後追い EoD による電力要求

実証実験に際し、前述の EoD 対応家電のようなインテリジェンスを持った機器を用いるのが理想であるが、そのような機器を用いるのは高コストであるため、エネゲート社のスマートタップを用いて (家電を改造することなく) ソフトウェア的に EoD を実現した。

これはスマートタップ中で家電の電力消費を監視し、その履歴を用いて家電の現在のモードを判断してスマートタップから (その家電の代わりに) 電力要求を送信するというものである。短い時間ではあるが電力を使ってしまうから要求を出すため「後追い EoD」と我々は名づけた。後追い EoD ではスマートタップの各ソケットに対しルールを設定する。ルールはそこに接続された機器の特性に合わせて記述されており、過去一時間分程度の電力消費の履歴からその機器の状態を判断し、適切な電力要求を行う。EoD により許可された電力はソケットのソフトウェアブレーカ

ーに設定され、設定値を越える電流が 3 秒以上流れるとそのソケットは強制的に OFF の状態になる。

後追い EoD において各機器は従来家電であるため、電力要求が満たされない場合でも電力を使い続けようとするが、スマートタップ側で送電遮断することによって擬似的に EoD を実現しているのである。

後追い EoD では本来の EoD のような細やかな機器のコントロールはできず、電力が得られない場合は単に機器の電源が OFF になるだけである。しかし、ソフトウェア的な設定のみで新たな機器に対応することができるため、多くの機器を使う場合に有用であり、また一般家庭への EoD の最初の導入としても非常に有用である。

我々は後追い EoD を用いて実証実験をおこない、優先度の高い機器に優先的に電力が割り当てられることを確認した。

4.2.2 経路制御層の実装

経路制御層の実装として、電力網のグラフ構造を把握し電力フローの設定をする EoDresv を実装した。

EoDresv は電力網のグラフ構造把握のために NodeInfo および LinkInfo の 2 種のメッセージを用いる。NodeInfo は各ノード (家電や電源、電力ルータなど) の ID および、電源の場合は供給可能な電力を持つ。また LinkInfo はノード間のリンクの情報として、送電側ノード名、受電側ノード名リンクを通りぬけるためのコストを持つ。この二つのメッセージにより、各ノードは網の構造を知ることが可能となる。

また、EoDresv は電力要求の送受信と送電経路の制御を行うため、ReqMsg, PathMsg および ResvMsg の 3 種のメッセージを用いる。ReqMsg は機器の電力要求を行うメッセージであり、電力フロー名、機器名、および電力要求リストを持つ。次に PathMsg は電力要求リストの何番目を満たすことができるか、および送電経路を伝えるためのメッセージであり、電力フロー名、送電元(自分自身)のノード名、送電先のノード名に加え、何番目の要求を満たすことができるか、送電のための経路、要求を満たすために他の電力予約を破棄することが必要な場合の破棄される電力予約のリストなどの情報を送ることができる。この PathMsg は、電源が ReqMsg を受けとった際に ReqMsg の要求を満たせると判断されたときに送信される。ResvMsg では電力フローの設定を行い、このメッセージには電力フロー名、送電元のノード名、送電先のノード名、設定される電力要求、送電のための経路の情報を持つ。PathMsg を受け取った機器は、ResvMsg を返して電力フローを設定する。これらの 3 つのメッセージを用いることにより、EoDresv では以下の図 3 のように、まず機器が電源に対して ReqMsg を出し、電源が要求を満たせると判断したら機器に PathMsg の応答を返し、機器が ResvMsg を電源に送信するという 3 ウェイ・ハンドシェイクによって電力経路を制御する。

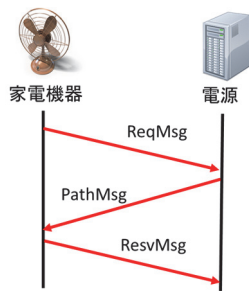


図 3 EoDresv における 3 ウェイ・ハンドシェイク
Figure 3 3 way handshake on EoDresv

EoDresv は複数の電源があるような状況をサポートしている。このような電力網では、一つの機器からの ReqMsg を複数の電源が受けとり、それぞれが個別に判断して PathMsg を出すことになる。消費機器は複数の PathMsg を受けとり、機器においてその中の最も良いと判断されるものを選んで一つだけ ResvMsg を送信することになる。複数の電源は要求に答えることのできる電力、優先度や電力の品質を PathMsg として個別に機器へと送信するため、機器側において得られる電力とその質をそれぞれの機器個別の判断で評価して適切な電源を選ぶことが可能となる。

4.2.3 物理層の実装

物理層の実装として、スマートタップが持つソフトウェアベースの回路ブレーカ機能[14]を用いた。この回路ブレーカ機能は、コンセントごとに定められた電流値を基準として、あるコンセントの家電機器が消費する電流値が基準値を超過している状態が継続した場合、該当コンセントのリレーをオフすることにより機器への電力供給を止めるという機能である。ソフトウェア実装のため、一般的な熱動式・電磁式のブレーカと違い、たとえば「コンセント3について、5A を基準として 120%の超過が 15 秒継続した場合に遮断」といった遮断条件のパラメータ設定（基準電流値と超過割合、継続時間）を、コンセントごとの家電機器の電力消費の特徴や電力マネジメントのポリシーに合わせて調節することができる。このパラメータ設定は、スマートタップ上の CGI インタフェースを介して上位層のプロトコルから変更することが可能である。

また、物理層のホームゲートウェイ[16]においてはルールの通信およびデータの収集を担っている。まずルールは、宅外にあるセンターサーバから各家庭のホームゲートウェイに配信される。その後ホームゲートウェイが最新ルールを受信すると、ホームゲートウェイから各スマートタップに更新通知を送信し、スマートタップがルールをホームゲートウェイに取りに行くことでルールの配信が行われる。データ収集については、スマートタップがホームゲートウェイと同一ネットワーク上に存在すればスマートタップで計測されたデータがホームゲートウェイに自動的に収集される。ホームゲートウェイは計測データから通信できているスマートタップを検出し、スマートタップのソケット毎

に割り当てられるデバイス ID をスマートタップ情報に登録する。しかし、デバイス ID に紐づく接続家電機器名・定格消費電力等の情報はセンターサーバからは与えられないため生活者によるスマートタップ情報管理画での入力が必要となる。そしてスマートタップは、ホームゲートウェイが保持する接続家電機器名を参照し、機器名に対応したルールに基づき EoD 制御を行う。また、スマートタップ情報管理画で登録した情報をスマートタップは定期的に監視しているので、スマートタップのソケットの接続家電機器を変更したい場合は管理情報を変更しておけば自動的に適切なルールが反映される。

4.3 心理的側面

従来、消費電力がブレーカの上限值を超えると電力が遮断されるため、その回路の家電機器への給電は全て止まることになる。さらに、炊飯器のように動作中に遮断されると復電しても元の動作に復旧できない機器もあり、電力超過により電気が遮断されることは極力避けなければならない。本提案手法である EoD システムを使うことで、消費電力が閾値を超過したときはルールに基づき優先度が低い機器のみ OFF または要求より低消費電力運転にすることができ、ブレーカによる電気が遮断されることを防ぐことが可能であり、消費電力超過による影響を従来に比べ抑えることが可能となる。

またホームゲートウェイにおいて現在使用している電力の収集を行っていることから、この値をアプリケーションによって「見える化」を行うことができる。このアプリケーションを用いることにより、スマートタップにおいて現在使用している電力および、現在電力の使用を抑えようとしている目標値、および現在使用している機器がルールを使用することによって機器の電力の消費を抑えられたのかということを可視化することができる。これにより心理的側面から電力の消費を抑えることができるということがわかっていく。

これらにより電力の消費を抑えた場合においても QoL をなるべく下げずに行くことが可能となる。

5. 実証実験および考察

5.1 実証実験

我々は前章において述べた要求/応答層、経路制御層、物理層の三層のプロトコル階層を持つ家庭内オンデマンド電力管理システムを京エコハウスにおいて実装した。

京エコハウスにおいて実装したシステムで用いた三層構造の内訳は、要求/応答層として後追い EoD を用いた場合におけるルールエンジン、経路制御層として EoDresv を用いた経路制御、物理層として従来の家電機器およびスマートタップおよびホームゲートウェイを用いた。

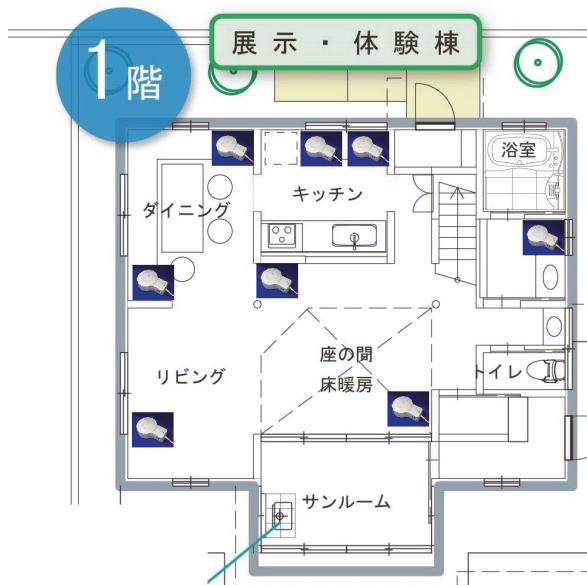


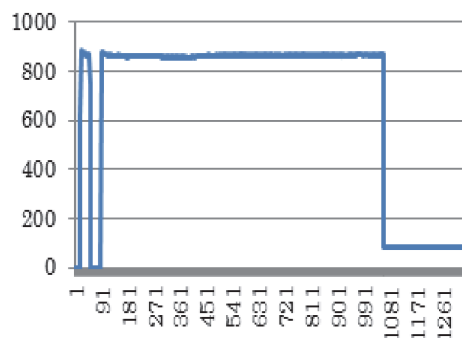
図 4 京エコハウス見取り図

Figure 4 Sketch of Kyoto Eco House

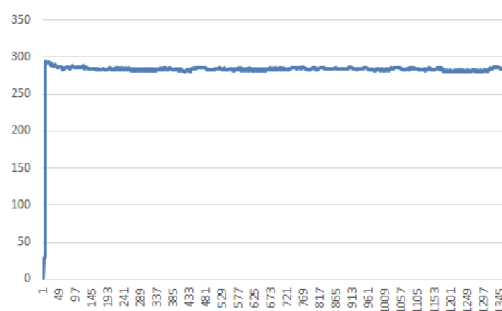
上図 4 のようにエコハウスにおいてスマートタップを設置し、実験機器として洗濯機・コーヒーマーカー・加湿器・炊飯器等の家電製品を用いて実証実験を行っている。

本実験ではスマートタップに既存の機器として電気ポット・炊飯器・電子レンジを接続し EoD が動作することを検証した。

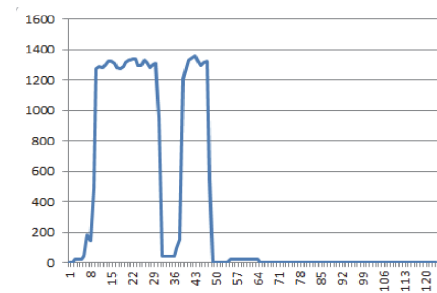
まず、これらの 3 つの既存の機器の電気消費は以下の図 9 のように示される。各図の縦軸は消費電力 (W) を示しており横軸は時間 (s) をあらわしている。



(a) 電気ポットにおける電力消費



(b) 炊飯器における電力消費



(c) 電子レンジにおける電力消費

図 5 使用家電機器の電力消費

Figure 5 Energy consumption of energy equipment

これらの機器（例えば電子レンジと炊飯器）を同じ電力網において同時に使用した場合、1500W を超えてしまいブレーカが落ちる可能性がある。

そこで、各家電に要求電力および優先度をつけ EoD が実際に働いていることを下記の実験において示す。

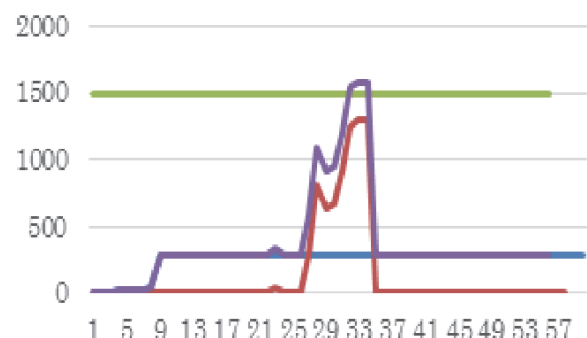
実験 1：炊飯器が接続している状況において、同一の優先度を要求する電子レンジが接続された場合

実験 2：電気ポットが接続している状況において、より高い優先度を持つ電子レンジが接続された場合

実験 3：電気レンジが接続している状況において、より低い優先度を持つ電気ポットが接続された場合

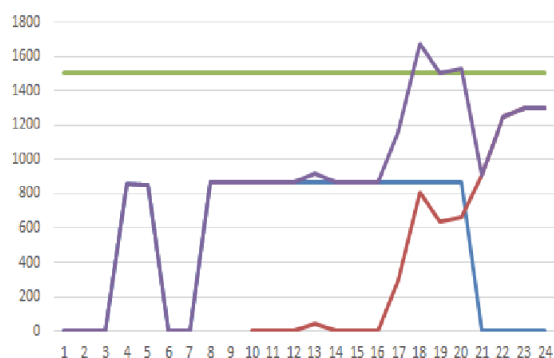
いずれの場合も 2 つの機器を同時に使用すると 1500W を超えることから供給可能電力量を 1500W と設定する。これにより EoD システムによりいずれかの機器のみが使用することが可能となる。

実験 1~3 において消費した各機器が消費した電力およびその合計ならびに供給可能電力量を示したのが以下の図 6 である。

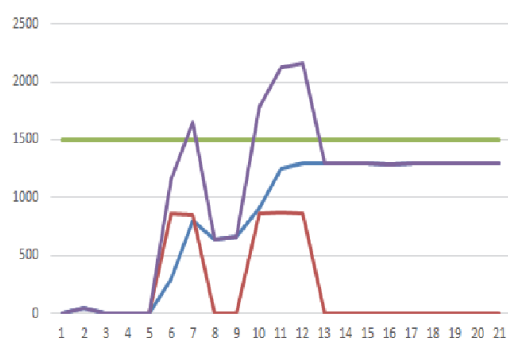


(a) 実験 1 における電量の使用状況

(青：炊飯器，赤：電子レンジ，紫：合計(W))



(b) 実験 2 における電量の使用状況
(青：電気ポット，赤：電子レンジ，紫：合計(W))



(c) 実験 3 における電量の使用状況
(青：電子レンジ，赤：電気ポット，紫：合計(W))

図 6 実験結果

Figure 6 Experimental result

この結果，同一の優先度のものが接続された場合に供給可能電力量を超えた場合は先に接続していたものが優先され，また優先度が高いものが接続された場合は低いものがあれば奪い取りが発生することがわかる．また，優先度が接続したものよりも高いものしかなかった場合にはその要求は却下される．これにより，供給可能電力量の瞬時値を考慮に入れつつ，機器の要求につける優先度に基づいて機器を使用することが可能となる．

5.2 考察

今回の実験においてはスマートタップを用いた後追い EoD であることからどうしても機器が現在どのモードであるかを判断するために供給可能電力量を超えてしまう時間というものがある．これはスマートタップにおいて使用している電力の計測頻度および EoDresv におけるルールの起動時間と 3 ウェイハンドシェイクにかかる TTL の時間などによって引き起こされる．今回の実験においては 1s ごとにデータの収集を行っていることからおよそ 3s 程度の切り替わるまでの時間が発生している．このことから計測頻度を上げることにより切り替わるまでの時間を少なくすることは可能であるが，代わりにホームゲートウェイとスマートタップ間の通信の回数およびデータ量が多くなってしまいう問題点も発生する．また，本実験では過

去 5 分の時間の使用電力から機器の現在のモードの判定を行っているが，この粒度を均等間隔ではなく直近の時間になるほど粒度を細かくするなどを行うことでも精度を上げられるのではないかと考えている．

また，本実験においては QoL になるべく下げることなく確実に節電を実現することを目指してきた．この際に炊飯器などの途中で停止して欲しくないものの優先度を高くしておくことによって途中で止まることを防ぐことが可能となる．

後追い EoD を用いた場合と EoD 対応家電を使用した場合の違いについても，EoD 対応家電では複数の要求の中から要求の満たすものを選ばれるが，後追い EoD では実質第一希望だけしか送れず要求電力が満たされなければ切断されてしまう．とはいえ，このスマートタップを用いた後追い EoD は機器のコントロールを行うために改造を行わなければならない EoD 対応家電を作成するよりも非常に簡単であることから簡単に導入することが可能となる．また，エネゲート社においてスマートタップに ZigBee 端末を取り付けスマートタップから機器を操作することによりスマートタップを用いた場合においても EoD 対応家電と同等のことができるようにする研究も行われている．

今回の実証実験において要求/応答層として後追い EoD を用いた場合におけるルールシステム，経路制御層として EoDresv を用いた経路制御，物理層として従来の家電機器およびスマートタップおよびホームゲートウェイを用いる場合について行った．また別の要求/応答層として EoD 対応機器を使った場合や物理層として直流給電網を用いた場合についても実験を行っている．このように三層モデルにすることにより，システムのうちのいずれかの層について実装することにより柔軟に拡張することが可能となる．

6. まとめ

本研究において EoD に基づいて機器から要求された電力と優先度を基に電力の割り当てをするプロセスを電力要求/応答層・経路制御層・物理層の三層構造を持たせて設計することにより，電力要求と応答・電力フローの設定・実際の送電を個別に対応することが可能であり，かつ機器の分散システム化を行うことにより，途中で使用する家電や電源が増えた場合においても停止することなく動かせるシステムの設計を行った．

また，この設計に基づいた電力要求/応答層・経路制御層・物理層の実装を行い，供給可能電力量の瞬時値を考慮に入れたシステムであることを示した．

謝辞 本研究は独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究「情報通信・エネルギー統合技術の研究開発」の助成によるものである．本プロジェクトのメンバーおよび関係者に心より感謝する．

参考文献

- 1) 住環境計画研究所：平成 17 年度一般家庭における HEMS 導入実証試験による省エネルギー効果の評価解析成果報告書，技術報告，新エネルギー・産業技術総合開発機構，2006.
- 2) エネルギー情報化 WG. <http://www.i-energy.jp/>.
- 3) 松山隆司, エネルギーの情報化とは - 背景, 目的, 基本アイデア, 実現手法 -, 情報処理, Vol. 58, No. 8, pp.926-933, 2010.
- 4) 加藤丈和, 湯浅健史, 松山隆司, オンデマンド型電力制御システム, 情報処理, Vol.54, No. 3, pp.1185-1198, Mar. 2013
- 5) 情報通信・エネルギー統合技術の研究開発(ICE-IT).
<http://www.net.ist.i.kyoto-u.ac.jp/ice-it/>
- 6) 小山洋一, 岡本暁広, 中野博樹, 家庭内電力網における電力管理技術の階層化設計, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, Mar. 2012
- 7) 岡部寿男, 情報通信・エネルギー統合技術の研究開発, システム/制御/情報 Vol.55, No.6, pp.221-226, 2011.
- 8) Takuya Miyamoto, Youichi Koyama, Kazumi Sakai, Yasuo Okabe, A GMPLS-based Power Resource Reservation System toward Energy-on-Demand Home Networking, The 12th IEEE/IPSJ International Symposium on Applications and the Internet (SAINT2012), pp.138-147, July 2012.
- 9) Masaya Yokohata, Tomotaka Maeda, Yasuo Okabe, Power Allocation Algorithms of PoE for on-Demand Power Supply The 1st IEEE International Workshop on Consumer Devices and Systems (CDS2013), (Proc. IEEE COMPSAC2013 Workshops), July 2013.
- 10) Tomoki Shibata, Kazumi Sakai, Yasuo Okabe, The Design and Implementation of an On-demand DC Grid in Home, 11th IEEE/IPSJ International Symposium on Application and the Internet (SAINT2011), pp.152-159, Jul. 2011.
- 11) 引原隆士, “電力のパケット化とルーティング技術,” 情報処理, Vol.51, pp.943-950, Aug. 2010.
- 12) Tsuguhiro Takuno, Yutaro Kitamori, Ryo Takahashi and Takashi Hikihara, AC Power Routing System in Home Based on Demand and Supply Utilizing Distributed Power Sources, Energies2011, Volume 4, Issue 5, Pages 717-726, May.2011.
- 13) 森本尚之, 藤田 有, 吉田雅昭, 吉水宏幸, 滝山田昌文, 明比輝一, 田中真実, 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, 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム (CDS) (採録決定)
- 14) Naoyuki Morimoto, Yuu Fujita, Masaaki Yoshida, Hiroyuki Yoshimizu, Masafumi Takiyamada, Terukazu Akehi and Masami Tanaka, Policy-based Power Router with Power Sensors for Efficient Allocation of Energy, The 1st IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2012), pp.477-480, Oct. 2012.
- 15) 藤田直生, 義久智樹, 塚本昌彦: “消費電力削減のためのルール制御型エネルギーオンデマンドシステム,” 情報処理学会論文誌, Vol., No. (2014, to appear).
- 16) 村上伸太郎, 井谷佳史, スマートタップを用いた宅内消費電力情報収集システムの開発, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 2012 年 3 月