

東京大学
情報理工学系研究科 創造情報学専攻
博士論文

低圧環境における抵抗負荷を用いた
電流型電力線通信の研究

池上 洋行

指導教員 江崎 浩 教授

2016年12月

概要

電流と電圧は、電気・電子回路の動作を解析し考察する上でもっとも重要な2つの要素である。現代の電気を用いた通信では、電圧に信号を重畳する方式が広く様々なところで用いられている。最初期の電信システムやアナログの電話システムなど、電流を用いた通信は、エネルギー効率や通信速度の観点から、ほぼすべてのシステムで電圧に信号を重畳する方式に置き換えられてきた。

既設の電力線を用いて通信を行う電力線通信においても、電圧を用いる方式が主流で電流を用いる方式に関する研究はほとんど行われてこなかった。本論文は、電流を用いた電力線通信の利点を議論・整理し新しい通信システムを提案するとともに、その可能性を議論している。

電流を用いた電力線通信(以下電流型)の、電圧を用いた通信方式(以下電圧型)に対する優位性として、信号の伝搬領域が挙げられる。あるコンセントに接続された通信装置から信号を送出した場合、電圧型では並列回路に信号が伝搬するのに対して、電流型では電源と通信装置の間のループに信号が伝搬する。この伝搬範囲の違いにより、電流型では通信信号の受信機を、電力線の分岐点に設置していくことで信号を送信した通信装置が当該電力線のどの位置にあるかを検出することができる。この特性を用いることで、どのような負荷が電力システムのどこに存在しているかということが把握可能となる。例えば、この情報を用いることで、電力の需要制御(デマンド制御)において、適切な負荷を選択・指定し、電力供給を遮断する需要制御を可能にすることができる。

本論文では2つの主題を議論している。第1の主題は、「電流型の電力線通信」に関する議論である。電流型の電力線通信を、建物内のような低圧電力システムに適用した例は過去になく、さらに低圧電力システムに向けた通信・制御装置も存在しない。新しい電流型の電力線通信として、Z3C(Zero Cross Current Communication)を提案した。提案方式であるZ3Cは、過去の高圧電力システムに向けた電流型電力線通信と比較して、通信機が小型で、より高速な通信を実現可能であることを、プロトタイプ実装による評価とともに示している。

第2の主題は、電流型の電力線通信を用いた回路遮断機による需要制御システムの設計と実装である。どのような接続機器が、どの分岐回路に設置されているかを、提案通信方式であるZ3Cにより把握することが可能となる。接続機器とその機器が接続されている分岐回路の情報をもとに、分岐回路の優先順位づけを行い、あらかじめ定められた電力供給量の限界値を越えることがないように需要制御を実現するシステムを提案した。この需要制御システムにより、例えば自家発電を用いる場合において、従来の静的な回路遮断機の制御と比較して、より高い電力供給能力と、電力供給を遮断したくない機器の優先的な継続稼働が実現可能となることを示した。さらに、接続機器

の同定・把握が通信機能を用いて実現可能となることを利用した，太陽光発電などの直流システムや家電製品の状態監視など，従来システムでは実現が困難であったアプリケーションを実現可能となることを示した．

本論文における研究により，従来の建物における電力需要制御システムでは実現することのできなかった，高い電力供給量と選択的な負荷機器の需要制御を可能とすることができること，さらに，多様なアプリケーションが低コストで実現可能となることを明らかにすることができた．本論文の研究成果は，今後のスマートグリッドの研究開発において電流型電力線通信を利用することの利点とその実現可能性を示したものである．

目次

| | | |
|-------|---------------------------|----|
| 第 1 章 | 序論 | 1 |
| 1.1 | はじめに | 1 |
| 1.2 | 本論文の構成 | 3 |
| 第 2 章 | スマートグリッドと電力線通信 | 5 |
| 2.1 | 建物での需要応答と接続機器識別 | 5 |
| 2.2 | 電力線通信 | 9 |
| 2.3 | 本研究が実現する未来像 | 16 |
| 第 3 章 | 単方向電流型電力線通信 | 17 |
| 3.1 | 背景 | 17 |
| 3.2 | 関連研究 | 19 |
| 3.3 | 電圧零交差点での電流通信 | 21 |
| 3.4 | 実験・結果 | 28 |
| 3.5 | 考察 | 34 |
| 3.6 | まとめ | 37 |
| 第 4 章 | 双方向通信への拡張 | 39 |
| 4.1 | 背景 | 39 |
| 4.2 | 関連研究 | 41 |
| 4.3 | 電流ブロックによる下り方向通信 | 44 |

| | | |
|--------------|---------------------------------|-----------|
| iv | 目次 | |
| 4.4 | ZMAC: Z3C の媒体アクセス制御 | 52 |
| 4.5 | 実験と考察 | 54 |
| 4.6 | まとめ | 61 |
| 第 5 章 | 応用例: 回路遮断機による需要制御 | 63 |
| 5.1 | 背景 | 63 |
| 5.2 | 関連研究 | 64 |
| 5.3 | 回路遮断機での自動需要制御 | 66 |
| 5.4 | システムの数学的モデル化と制御アルゴリズム | 72 |
| 5.5 | 需要制御システムの実装と実験 | 74 |
| 5.6 | まとめ | 81 |
| 5.7 | その他の応用先 | 81 |
| 第 6 章 | 結論 | 83 |
| 6.1 | 今後の課題 | 83 |
| 6.2 | 技術・学術的貢献 | 84 |
| 6.3 | おわりに | 85 |
| | 参考文献 | 87 |
| | 発表文献と研究活動 | 95 |
| | 謝辞 | 97 |
| 付録 A | プロトタイプ通信機の詳細仕様 | 99 |
| A.1 | フットプリント | 99 |
| A.2 | 部品表 | 99 |
| A.3 | 回路図 | 103 |

| | | |
|------|-------------------------|-----|
| 付録 B | リーディングプログラムとの関係性 | 105 |
| B.1 | 各章との関係性 | 105 |
| B.2 | プログラム内での活動と貢献 | 106 |

表目次

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | アプリケーション毎の接続機器識別 | 9 |
| 2.2 | 電力線通信技術の分類 | 12 |
| 2.3 | PLC 方式の比較と分類 | 14 |
| 3.1 | 実験用の送受信機実装 | 29 |
| 3.2 | 提案手法と従来手法の比較 | 35 |
| 4.1 | 実験機材を構成する部品リスト | 55 |
| 5.1 | 需要制御システムを, SCB, Smart Device, Smart Power Strip の三種の装置で 作った場合の違い | 66 |
| 5.2 | SCB を用いた需要制御システムと従来の静的システムの比較 (単位はアンペア) . . | 80 |

目次

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | コンセント接続機器の需要制御のための直接的方法と間接的方法 | 7 |
| 2.2 | 基本的な電力線通信での電圧信号 | 10 |
| 2.3 | 引き込み式と押し出し式の二種類の電流型 PLC | 13 |
| 2.4 | 建物内の低圧電力システムにおける電圧型と電流型の伝搬範囲の違い | 15 |
| 3.1 | Z3C と従来型電力線通信の信号伝搬の違い | 18 |
| 3.2 | Z3C における電流パルスの波形 | 22 |
| 3.3 | Z3C システムの電気回路モデル | 24 |
| 3.4 | Z3C の送信機 | 26 |
| 3.5 | Z3C の受信機 | 26 |
| 3.6 | 実験設定 | 28 |
| 3.7 | 抵抗値別の電流パルス波形 | 30 |
| 3.8 | パルス発生の重ね描きによるアイパターン | 31 |
| 3.9 | 送信パルス幅 T_w に対する受信エラー量 | 32 |
| 3.10 | 検出エッジ高のヒストグラム | 33 |
| 3.11 | 各負荷装置の消費電流と送信機の電流パルス | 34 |
| 4.1 | 信号方向の定義 | 41 |
| 4.2 | 電流ループを用いた双方向通信システムの模式図 | 42 |

x 目次

| | | |
|------|--|----|
| 4.3 | 上り方向通信の重要な点まとめ: (a) 従来の PLC と Z3C の信号伝搬範囲の違い (b) 簡易的な通信の電気回路モデルと電流パルスに関するパラメータ (c) 電流パルスと実負荷による電流 | 45 |
| 4.4 | Current Blocking の概要図 | 47 |
| 4.5 | 下り方向通信を行う時の電気回路モデル | 48 |
| 4.6 | 低圧電源系統に接続される 4 種類の入力回路 | 50 |
| 4.7 | Current Blocking 実現のための回路図 | 51 |
| 4.8 | ZMAC の想定トポロジ | 52 |
| 4.9 | ZMAC フレームの概要 | 54 |
| 4.10 | 実験設定 | 55 |
| 4.11 | 通常の状態での電流パルス (左) とブロックされた電流パルス (右) | 56 |
| 4.12 | 上位で電流ブロックを行った際の 4 種類の負荷における出力電圧 V_{OUT} と消費電流の変化 | 57 |
| 4.13 | 多ノードでの通信実験環境 | 58 |
| 4.14 | 通信シミュレータによる台数に対する通信成功確率とリトライ回数の変化 | 59 |
| 4.15 | 通信機の台数別での最大リトライ時間別の通信成功確率とリトライ数 | 60 |
| 5.1 | 提案する SCB を用いた需要制御システム | 67 |
| 5.2 | SCB とコントローラ間の共通パケットフォーマット | 69 |
| 5.3 | 四種類のパケットメッセージ | 69 |
| 5.4 | コントローラの基本動作シーケンス | 71 |
| 5.5 | Simple + Adaptive アルゴリズムの動作フローチャート | 74 |
| 5.6 | スマート回路遮断機 (SCB) の実装 | 75 |
| 5.7 | SCB を用いた需要制御システムの実験用配置 | 76 |
| 5.8 | 2 つのアルゴリズムでの動作の違いを示す実験結果 | 78 |
| 5.9 | 提案システムが供給能力の制約を満足させることを示す実験結果 | 78 |

第 1 章

序論

1.1 はじめに

我が国の電力系統は日本屈指の巨大な電気工作物である。九州から四国を含んで北海道まで送電線で結ばれており、数百の組織が発電所を接続し、日本全体でその電力を消費する、巨大なひとつのシステムとして稼動している。日本の電力事業は 1887 年に東京電燈 [1] に始まる。明治 30 年代 (1900 年代) には 200 社を越える事業者が存在していた [2]。その後事業者間の統廃合が行われながら、電力系統の統合も進展した。その中で西日本が 60 Hz、東日本は 50 Hz という運用形態が構築された。太平洋戦争に対応するための国策として、電力系統による国営での九電力体制に移行した。太平洋戦争終結後には、民営化され現在の形となり、各地域間を結ぶ連系線が整備され、1965 年には周波数変換所が静岡県に設置され周波数の異なる東西の電力系統が連系された。このように、我が国の電力系統は、100 年以上の年月をかけて進化してきたひとつの巨大なシステムなのである。

電力系統が社会インフラとして重要なものになるにつれて、安定稼動に関する研究や系統連系に関わる技術の研究など、電力系統にかかわる研究が広範囲に推進されてきた。そのような中、近年注目を集めている新しい電力系統への進化に関する試みとしてスマートグリッド [3] がある。スマートグリッドは、IoT(Internet of Things)・M2M(Machine-to-Machine)[4] と呼ばれるコンピュータ技術の流れを電力系統に取り込み、電力系統の高機能化・高効率化を実現する試みである。電力系統の運用には、「同時同量の原則」と呼ばれるものがある。これは電力の需要量・供給量はある時間で同量にならなくてはならないと言う原則である。しかし需要側と供給側を調停するための技術は現在のところ確立できておらず、多くの場面で供給側が需要側にあわせて電力系統を運用している。スマートグリッドの次世代電力システムでは、電力系統の各所にコンピュータを

2 第1章 序論

配置する。それらのコンピュータに需給状態を監視させ相互通信させることで、同時同量の原則を満足するための新しい技術的手法が実現・確立されなければならない。

スマートグリッドの研究は、多岐にわたるが、その中でもスマートグリッドを実現するための通信方式・通信システムに関する研究は最も活発な研究開発領域のひとつである。スマートグリッドに用いる通信方式を検討するうえでは、現在の電力系統の電力供給範囲と同じ広さの通信領域を実現・確保することが重要となる。例えば携帯電話網の利用を想定した場合、電波の届かない地下や山間部における通信をどのようにして実現させるかという問題を解決しなければならない。具体的な解決法としては、無線マルチホップ通信システムの利用など、複数の通信方式・通信システムを適宜利用・導入することで、電力の供給領域を通信領域がすべて含むようなシステム構成にすることが必要条件となる。スマートグリッドにおいて利用される通信技術のひとつとして、電力線通信 (PLC: Power Line Communication) と呼ばれる、電力線を通信線として利用する技術がある。この技術はスマートグリッドでは、ほぼ全ての機器が電力線に繋がっていることから、電力供給範囲と通信範囲を容易に一致させることが可能になると期待されている。

電力線通信とは、すでにある電力線をそのまま通信線として、電圧の周波数領域 (kHz~MHz) に信号を重畳し通信する技術である。電力線通信はスマートグリッドへの要求とは独立して、1922年頃から独自に進化してきた。高速化やノイズ源・チャンネル定式化などの研究が広く行われてきた [5][6][7]。電力線通信は通信のための信号を数 kHz 以上の周波数で電力線に重畳する。このため信号の伝搬や変調方式など多くの技術や課題を、無線通信技術やデジタル加入者線通信 (xDSL) 技術と共有しており、有線上の無線信号 [8] とも呼ばれることがある。無線通信や xDSL の技術進化とともに電力線通信も通信速度、通信距離、ノイズ耐性を向上させてきた。近年では、スマートグリッドへの要求を考慮し、多くの電力線通信の研究者が、電力線通信をスマートグリッドに運用するための研究開発を行っている [9]。

本論では、従来までの電圧を主に用いた電力線通信と異なり、電流を主に用いた電力線通信についての研究を行っている。電流を用いた電力線通信は、次のような理由から、今日までほとんど研究がされてこなかった。ほとんどのアプリケーションにおいて電圧を用いる形式の方が主に効率と通信速度の観点からすぐれており、また無線通信や xDSL との間での技術移転が相互に可能であるためである。しかし、“一般的な” 通信のためでなく、スマートグリッドのための通信として用いる場合には、電流を用いる方式 (電流型電力線通信) にしか実現できないアプリケーションが存在する。本論文は、電型電力線通信に関する技術について、とくにスマートグリッドへの応用に着目した研究を行っている。

1.2 本論文の構成

本論文は次のように構成される。

第2章でスマートグリッドと電力線通信を俯瞰しながら、本論文が解決する課題と根幹となる提案手法を明かにする。

第3章では、本論文の根幹となる提案方式である Z3C(Zero Cross Current Communication) について述べる。Z3C は、電力線を木構造でみた場合の下位から上位方向への単方向通信を電力系統から電流を引き込むことで単方向でのデータ通信を実現する。電流型の電力線通信の特性と共に、手法を実現するための回路構成などに関する提案も行っている。

第4章では、第3章で述べた単方向での電流型電力線通信を双方向に拡張する。加えてマスタ/スレーブ型のデータ通信を実現し、多数の通信機を持つネットワークへ拡張する。原理と実現回路に加えて、メディアアクセス制御や通信用フレームの設計についてもこの章で記述している。

第5章では、電流型電力線通信を用いた回路遮断機による電力の自動需要応答システムについての議論を行っている。電力の供給能力にあわせた遮断閾値を回路遮断機に広告しておくことで、需要が電力供給能力を超えないように回路遮断機で電力の需要を制御する。またその他に実現可能なアプリケーションである家電製品の状態監視や、直流システムへの適応などに関する議論を行っている。

第6章で本研究の今後の課題について述べ、論文をまとめる。

第 2 章

スマートグリッドと電力線通信

本章ではスマートグリッドにおける負荷機器識別の課題を整理し、その解決策として従来行われてきた研究に関する俯瞰を行った後に、本論文で主に扱う電力線通信による解決方法を議論する。電力線通信の研究開発の歴史を整理しながら、負荷機器識別というタスクに直接的に応用することが容易ではないことを指摘する。

2.1 建物での需要応答と接続機器識別

2.1.1 需要応答

電力システムの運用では、需要と供給を同時同量にしなくてはならない(=「同時同量の原則」)。この“同時”の時間幅は、システムの規模に依存するが、ひとつの目安として、30分という値が広く採用されている。この30分という値は、日本の電力システムにおける2016年現在で、同時同量が保たれているか判定を行うときの共通の指標である。日本においては、電力小売業者が事前に予定していた需要量に対して30分間の需要量が上回ると超過分にインバランスペナルティがかせられる。電力自由化では、インバランスペナルティを含めたインセンティブ構造の設計により、経済的な枠組みを経由して同時同量の原則を満たすように設計されている。

需要応答とは、同時同量の原則を満たすための方法の分類の1つであり、需要量を変動させて供給量にあわせる手法の全般をさす。古くから行われている方式としては、需要の大きな工場や施設に対して電力供給側から人伝に連絡し、需要を抑制してもらうというオフラインによる方法である。例えば日中の電気代単価を上げることで、需要側がなるべく日中に使わないように誘導するといった行為も需要応答の一種である。すなわち、従来の需要応答は、供給側の要請から需要側の応

答までに人間の作業が介在した。これを機械的に行おうという試みが自動需要応答である。

自動需要応答に関する技術は、プロトコル、予測、需要制御の三種類に大別できる。プロトコルとは自動需要応答に関するメッセージ交換の仕様であり、OpenADR[10][11][12] などがある。予測とは、需要の予測や需要応答の投機的な実行を行うための技術である。需要制御とは、OpenADRなどで与えられた需要応答要求に対して、実際に需要を制御する動作である。例えば、ある機器の電源 ON/OFF を制御するなどが需要制御にあたる。本論文で提案していく通信手法は、この需要制御の中で使われるものであるため、以下では、需要制御に関する議論を行う。

2.1.2 建物自動化システム

アメリカ合衆国のエネルギー省が発行しているデータブックによると、電力の需要家は居住用オフィス用を含んだ建物、工場など産業向け施設、電車などの移動施設の3つに分類できる [13]。このデータブックによると、約4割の電力は建物で消費されており、また建物の消費割合が増えていく傾向にあることが報告されている。このことから、建物の電力需要の適切で効果的な制御が重要となる。

建物の電力需要制御を機械的に行うための手法として、建物自動化 (BA: Building Automation) システムがある。建物内部の施設を管理し、自動化するシステムである。消灯・点灯を指定時間に自動的に実効するような照明制御がその一例である。BA システムは多くの建物に既に導入されているが、今後もその導入は増加するであろうし、その高度化が推進されていくと考えられる。

多くの BA システムは照明と空調を管理できるように導入されることが多い。その理由には以下の2つが挙げられる。(1) 照明と空調をあわせた消費電力は、一般に5割を超えるため [14]、需要制御に対する費用対効果が良い。(2) その他に制御可能な装置が存在しない。居住者が設置するコンセントに繋がる装置などは、BA システムが導入される建物建設時には何がどこに繋がるかなどが決まらないため、従来の BA システムの管理下におくことが難しい。

2.1.3 接続機器識別

前述のようにコンセント接続機器など、現在の BA システムの管理下に置くことの難しい機器において、どのように需要制御を行うかは重要な課題である。コンセント接続機器向けの需要制御には、図 2.1 に示すような2つの方法がある。コンセント単位で電源の ON/OFF を行う装置を設置し、BA システムと繋いで電源 ON/OFF する直接的な方法と、機器と BA システムを何らかの通信手法で接続し、BA システムからの機器制御により間接的に需要を制御する方法である。後者

の方式は建物側と利用者側というステークホルダーの違いがあり，上手く相互接続し協調動作するシステムは研究されている [15][16] が課題もおおい．ここではコンセントで電源 ON/OFF を行う方法を考える．

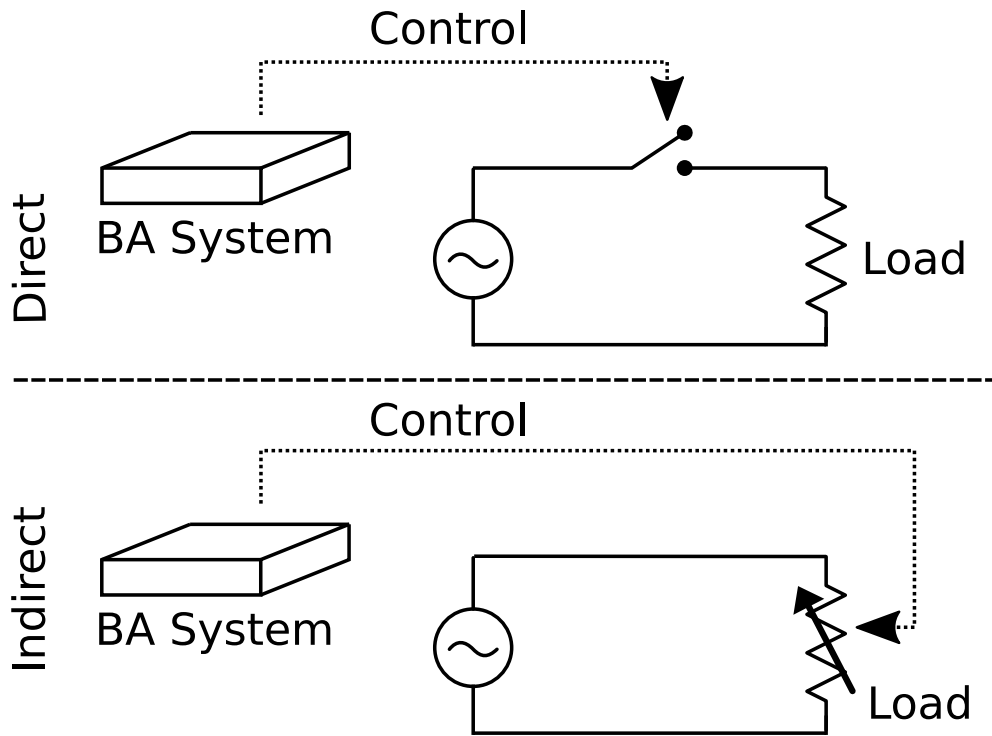


図 2.1: コンセント接続機器の需要制御のための直接的方法と間接的方法

コンセントやブレーカーなど，電力の供給を入切することによる直接的需要制御は，その効果が予測可能であるとともに確実である．しかしながら，接続先の機器側から見ると，供給を止める制御がかかった時に，突然電力が供給されない停電状態となってしまう．停電状態は，ほとんどの機器においてその時動作しなくなるだけで，機器そのものに破損を伴うことはない．一部の大型装置やコンピュータなどでは，正常な手続きを取らず停電になどにより突然停止した場合に破損するものがあるが，こういった装置は正常停止状態になるまでの電力を賄う無停電電源装置が搭載されている場合が一般的である．他にも家電製品の内部時計が狂う可能性などもあるが，多くの家電製品は数時間程度の停電であれば問題ないよう内部に，コイン型乾電池や電気二重層コンデンサといった蓄電池を搭載している．このように直接的な方法は，機器障害などを引き起す可能性はすくない．しかしながら，制御時に機器が使えないという不便さが存在する．一方で，その制御点より下位への電力供給をゼロにすることができるため制御による削減量を事前に知ることができる利点

8 第2章 スマートグリッドと電力線通信

がある。

電力を直接制御する前述のようなシステムを実現する際に、接続機器識別のタスクは極めて重要である。コンセントやブレーカーに無線通信や電力線通信などの通信機能を持たせ、コンピュータなどから制御する機器(以後、通信遮断機とする)は、自身の配下にどのような装置が繋がっているか不明な状態である。そのため設置時に通信遮断機の識別番号と下位の負荷装置の対応付けを書き出しておく必要がある。このタスクが接続機器識別 (Appliance Identification) である。

接続機器識別には2つの分類指標、粒度と更新頻度がある。各機器に一意的な識別番号を与えられた状態で、これらの識別番号を識別する固体識別、機器のA社のMブックといった製品名などを識別する機器識別、ラップトップやテレビといった機器種別識別、そしてもっとも粗いのは、負荷は照明装置であるといったグループ識別である。更新頻度とはこれらの識別をどのような頻度・契機で行うかであり、設置時に対応付けする静的なものや、何らかの技術を用いて機器挿抜にあわせて識別する動的識別がある。具体的な例としては、BAシステムなどで現在多くの場面で行われているのは静的グループ識別である。ある通信遮断機の下位に決められた空間の照明を接続しておき、ある時間になると点灯・消灯するなどの制御を行う。他の例では、電気自動車では動的個体識別となっている。電気自動車の充電用コネクタには通信線が埋め込まれており、充電ステーションに接続することで電気自動車の固体識別番号を充電ステーションに送信する。この情報は課金に用いられる。いくつかの企業がとくにコンセント向けに通信遮断機をスマートタップなどの商品名で販売しているが、これは静的固体識別を行っている。通信遮断機の識別番号と接続した負荷(接続装置)の識別番号の対応表を設置時に作成する。

また研究として広く行われている手法として、時系列データマイニングを用いる方法がある。通信遮断機が持つ電力計測機能を用いて取得した電力の消費パターンから、接続機器を同定するというものである。さらに進んだ研究としては、複数の機器が接続され、混ざりあった電力の消費パターンを各機器に分離するNILM(Non-Intrusive Load Monitoring)という手法がある。NILMでは分離後に各パターンごとに機器を同定する。これらの研究は動的な機器種別ないし機器種別識別に当る。また、この時系列データマイニングを用いる方法の利点としては、新たな装置を必要とせず、電力計測装置のみで可能な点があげられる。このような従来までの技術・研究をまとめると表2.1となる。

表 2.1: アプリケーション毎の接続機器識別

| | | | | |
|------|----------------|-------|------------|---------|
| | 従来の通信遮断機での需要制御 | 電気自動車 | NILM | スマートタップ |
| 粒度 | グループ | 個別 | 機器 or 機器種別 | 個別 |
| 頻度 | 静的 | 動的 | 動的 | 静的 |
| 追加装置 | 不要 | 必要 | 不要 | 不要 |

電気自動車のような、個別識別が動的で出来る仕組みをすべてのコンセントに導入することが本来求められる。しかしながら、すべてのコンセント・プラグを変更していくことは設置コストの観点から現実的とは言えない。そこで、本論文では、既存のコンセント・プラグの変更を必要としない電力線通信による接続機器識別についての研究を行った。

2.2 電力線通信

電力線通信 (PLC) の技術は、超狭帯域電力線通信 (UNB-PLC: Ultra-Narrowband PLC), 広帯域電力線通信 (BB-PLC: Broadband PLC), 狭帯域電力線通信 (NB-PLC: Narrowband PLC) の 3 種類に整理することができる。本節ではこれらの各技術の特徴や応用先について述べ、その後には電流型と電圧型の PLC を比較・検討する。従来の PLC は電圧の周波数ドメインに信号を重畳する図 2.2 のような、電源の電圧に高い周波数の信号を重畳する手法である。PLC 用の通信装置は、周波数ドメインに信号を重畳する機構と、周波数ドメインに乗った信号を取り出す機構を持つ。UNB-PLC, NB-PLC, BB-PLC の各 PLC は、この周波数ドメインの帯域や、信号の方式などが異なる。その結果通信速度やノイズ耐性などに違いが生ずることになる。

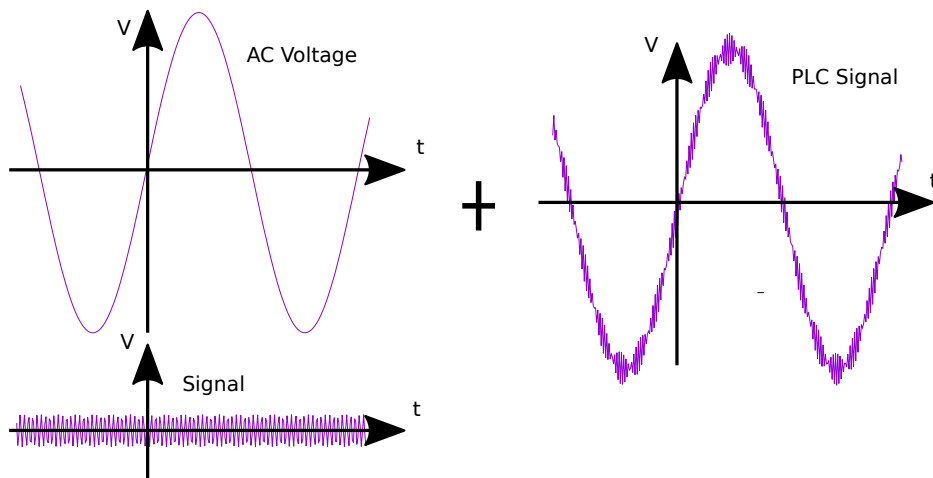


図 2.2: 基本的な電力線通信での電圧信号

2.2.1 超狭帯域電力線通信

UNB-PLC は、数 kHz 以下というとても低い周波数領域を用いる手法を指す。一般に 100 bps 以下の低いデータレートである。具体的なシステムとしては、Ripple Control[17], Turtle[18], TWACS[19][20] などがあげられる。主に電力システムの維持管理にかかわるデータ量の少ない通信に用いられる。

Ripple Control は 1950 年代から現在に至るまで使われている技術である。電源周波数のハーモニクス周波数かつ数百 Hz 程度までの周波数をキャリアとして信号を電圧に印加する。このような周波数を選択することで、高圧低圧を変換するトランスを、信号が超える通信が実現可能となる。典型的には一方向のブロードキャスト型の通信であり、信号機の制御などに使われる。

Turtle System 1 は、Ripple Control とは逆方向の装置で、電力メータの計測値を変電所で収集するための通信技術として利用されている。しかしながら具体的な技術仕様は公開されていない非オープンな技術である。TWACS は Turtle System1 と Ripple Control を組合せたような技術であり、双方向の通信が可能である。TWACS では変電所と電力メータ間の相互通信を目的としており、変電所から電力メータでは電圧の零交差を時間軸で前後方向にシフトさせることで信号を伝える。電力メータから変電所では、電力メータ側でコイルを用いて回路をショートさせることにより電流パルスを発生し、この電流パルスの有無で信号を伝える。

UNB-PLC は、アプリケーションに特化して設計・開発されており、他の PLC 技術と比べて手

法の一般化などは進んでいない。

2.2.2 広帯域電力線通信

BB-PLC とは、数 MHz から数十 MHz の周波数帯を用いて、数 Mbps 以上のデータレートを実現する技術のことをさす。建物内部のネットワークを容易に広げることを目的としており、Wi-Fi と補完的な関係にある。具体的なシステムとしては、HomePlug[21] や HD-PLC[22] や UPA[23] がある。また広帯域電力線通信においては、IEEE での標準化が行われ、HomePlug と HD-PLC が含まれた IEEE1901-2010[24] がある。

HomePlug と HD-PLC は物理層が異なるが、IEEE1901-2010 で規格化された ISP(Inter-PHY Protocol)[25] を用いることで協調して動くことができる。UPA, IEEE1901-2010 共に数百 Mbps 程度の規格値であるが、HomePlug で規格化が進んでいる HomePlug AV2 は MIMO を用いた高速化が盛り込まれており、1200 Mbps の規格値を持っている。

BB-PLC はコンクリートや石で作られた建物において、Wi-Fi のバックホール回線として使われており、BB-PLC 対応の Wi-Fi アクセスポイントなどが市場で販売されている。日本においては、木造の家が多いことに起因して電力線からの漏えい電磁界が他の通信装置に影響があるという議論が長く行われており、同様の理由で Wi-Fi 電波の通りがよく、Wi-Fi 製品が 2016 年現在では使われている。しかしながら、近年ではビル内部の RS485 配線に BB-PLC モデムを取り付けることで通信速度の向上を行うなどの試みも行われており、今後広く使われる可能性はある。

2.2.3 狭帯域電力線通信

NB-PLC とは、数百 kbps 程度のデータレートを狭い帯域と低い周波数帯を用いて実現する技術のことである。UNB-PLC から続き古くから研究が行われ、現代でも自動検針などの安定・確実な通信が必要場面向けに研究開発が進んでいる。X10[26]、PRIME[27]、G3-PLC[28][29] などが NB-PLC としてあげられる。

NB-PLC の中でもとくに PRIME と G3-PLC は、電力メータの自動検針システムで使われており、共同で IEEE1901.2[30] を規格化した。2つの規格は符号化方式や目標とするデータレートが異なる [31]。しかしながら目標とするアプリケーションや求めている通信特性は近い。

その他のアプリケーションとしては建物内の装置制御の自動化なども NB-PLC で実現されている。X10 はアメリカやヨーロッパの照明制御などで利用されている。また巨大な建物では、

Panasonic のフル二線式照明制御システム [32] や Lonworks, KNX などが使われている。フル二線式は他の PLC と異なり、交流の電力線を用いず、専用の配線を用いる。通常、制御線と交流電力線を配線する必要があるがフル二線では両方を一对の電線で共用することが可能である。この技術も、周波数帯や原理としては NB-PLC として分類することができる。

2.2.4 電流型と電圧型

ここまで述べてきた UNB-PLC, NB-PLC, BB-PLC の各技術について、性能やアプリケーションをまとめると下記の表.2.2 のようになる。

表 2.2: 電力線通信技術の分類

| | UNB-PLC | BB-PLC | NB-PLC |
|-----------|---|--|--|
| 通信速度 | 1 kbps 以下 | 1 Mbps 超 | 1 kbps ~ 100 kbps |
| 周波数領域 | 1 kHz 以下 | 1.8 MHz~250 MHz | 3 kHz~500 kHz |
| 規格・アライアンス | N/A | HomePlug, HD-PLC, UPA, IEEE 1901 | G3-PLC, PRIME, IEEE 1901.2, KNX, LonWorks, X10 |
| 応用先 | 系統制御, 装置制御 | 高速データ通信, ビデオ配信 | 装置制御, センシング |
| 電線電圧 | 高圧, 高圧から低圧 | 低圧 | 高圧, 低圧 |
| 環境 | 屋外, 広域 | 屋内, 室内, 居住用建物内 | 屋外から屋内, 大型建物内 |
| 製品例 | Aclara TWACS, Landis+Gyr Turtle, Landis+Gyr Ripple Control System | Panasonic PLC アダプター, devolo PowerLine Adapters | 住友電気工業 スマートメータ通信ユニット, ECHELON i.LON Smart Server |

通常、電気回路を用いた通信では、電圧を用いることがおおい。電圧変動のために電流も流れるため、厳密には電圧だけを独立に変化させる訳ではないが、電圧に信号を重畳し、電圧変化を読み取ることで通信を成立させる。従来の電力線通信、とくに NB-PLC と BB-PLC は、電圧型の PLC であると分類することができる。

一方で、電流を発生させ、この電流を読み取ることで通信を行うような手法も存在する。アナログ電話 [33] や電信 [34] などがこの通信方式にあたり、電流型であると言える。電力線通信の中でも UNB-PLC である TWACS の子機から親機への通信も、系統の電力を機器に引き込むことで電流を用いた信号を作りだし通信を行う。このような方式を電流型の PLC であると分類できる。電流を用いた電力線通信を実現する方法としては、図 2.3 のように、電源の配置により 2 つの種類がある。1 つが前述の TWACS が用いる、系統自身を電源とする引き込み (Pulling) 式の方法で、もう 1 つが線路に対し誘導性結合を行い信号を重畳する押し出し (Pushing) 式の方法である。押し出し式は任意の箇所信号電流のループを発生させることが難しいため、実施例は少ないが、太陽光発電の直流回路側での実施例 [35][36] や、低インピーダンスの負荷を挿入することでループを形成した例 [37] などが存在する。これらの誘導性結合を用いた方式では、NB-PLC や BB-PLC のモデムを用いて電流型の PLC を構成している。本論文では、押し出し式の電流型 PLC は扱わないため、以降で電流型と呼ぶ場合には引き込み式の電流型 PLC を指すこととする。

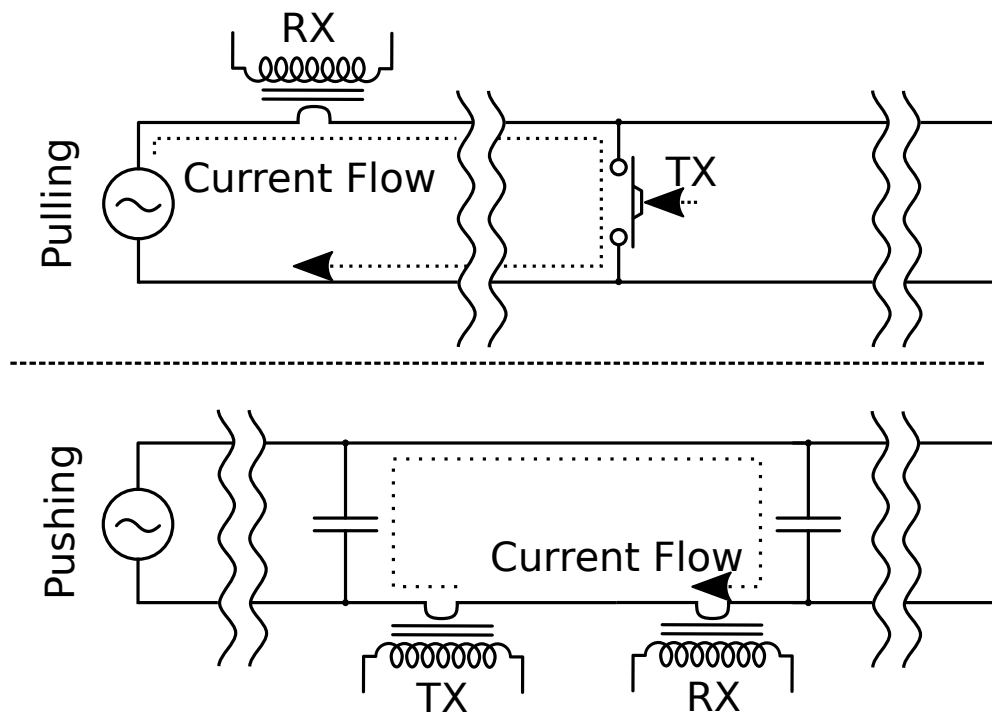


図 2.3: 引き込み式と押し出し式の二種類の電流型 PLC

この新しい分類である電流型と電圧型を用いて、従来の技術を分類すると表 2.3 のようになる。この表からも分かるように、電流型の PLC の例は少ない。これは電流をキャリアとする場合、電流が流れるループ上にしか信号が乗らないため、従来の PLC の応用先と適合しないためである。コ

ンセントに接続するだけで，ネットワークに繋がるという性質が PLC に求められており，実際にそのような環境を PLC は実現してきた．実際に従来のサーベイ論文や解説書籍では，通信のメディアに電流を用いるか電圧を用いるかというような分類は見られない [38][5][6][7][17][18]．

表 2.3: PLC 方式の比較と分類

| | UNB-PLC | BB-PLC | NB-PLC |
|-----|---|---------------------|-----------------------|
| 電圧型 | Ripple Control, Turtle, TWACS (親機→子機) | HD-PLC, HomePlug | X10, G3-PLC, PRIME |
| 電流型 | TWACS (子機 →親機) | 誘導性結合 [37] | 誘導性結合 [35][36] |

しかしながら，前節で述べたスマートグリッドでの接続機器識別タスクにおいては，電流型 PLC の特殊な伝搬特性が有効に働くため，接続機器識別用の引き込み方式電流型 PLC が望ましいと考えられる．図 2.4 に建物内の低圧電力システムの簡易的な模式図と，電圧式 (Voltage based) と電流式 (Current based) での信号伝搬範囲の違いを示す．この建物ではメイン遮断機の下位にグループ遮断機が配置され，その先に付加装置が接続されるとした．このような一般的な低圧電力システムにおいて，通信デバイス (Comm. Device) から通信信号を入れた際に信号伝搬範囲の違いがある．電圧式では，原則全体に信号が伝搬し，電流式では電源方向のみに信号が伝搬する．このため，電流式では，回路の分岐点に信号受信機を配置することで信号源の位置を特定可能になるという特徴が存在する．この位置特定機能が次節で述べる機器識別のタスクで重要となる．

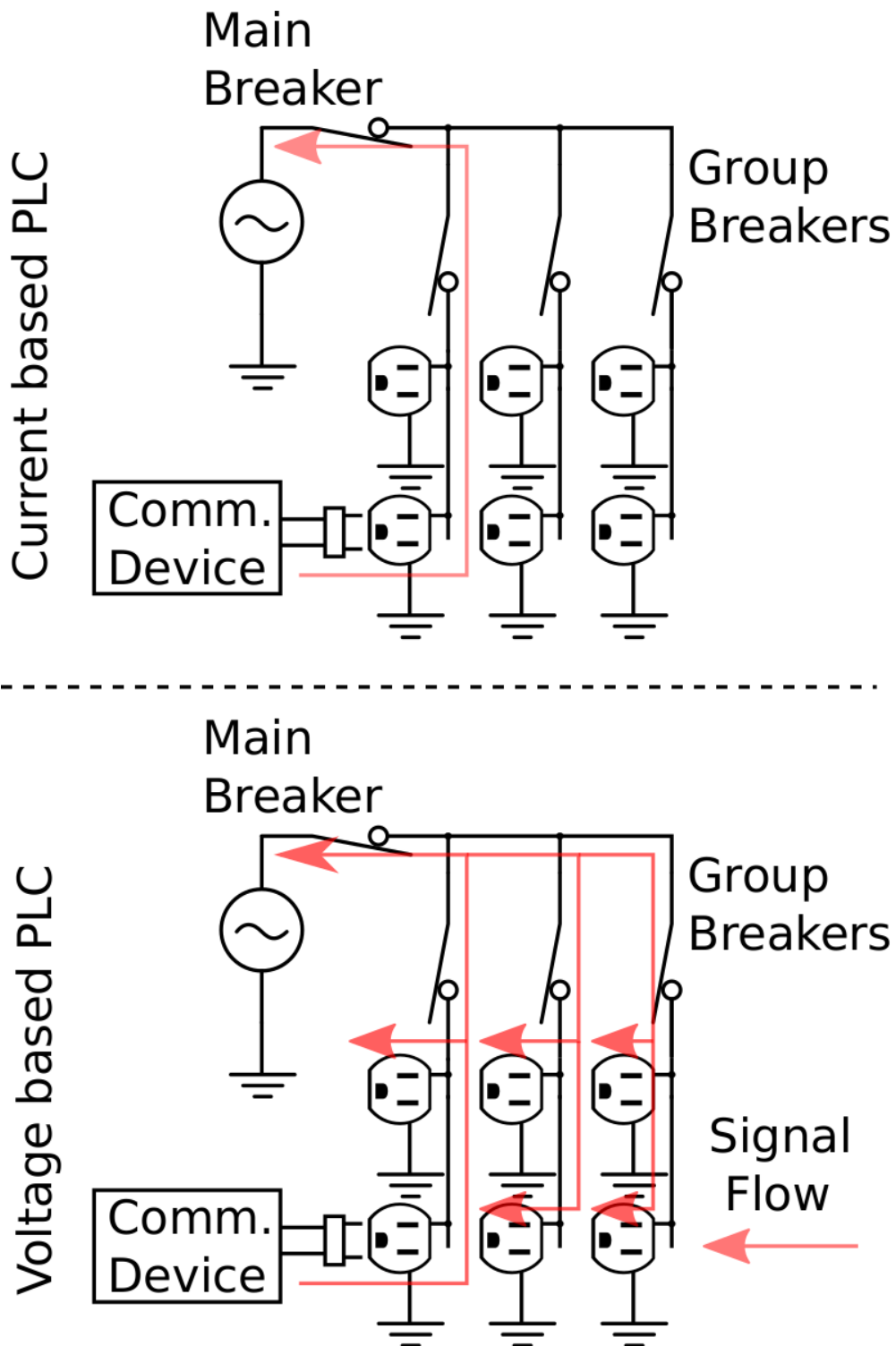


図 2.4: 建物内の低圧電力系統における電圧型と電流型の伝搬範囲の違い

2.3 本研究が実現する未来像

今後は、建物からの需要制御のためには接続機器の自動識別 (Appliance Automatic Identification) が重要なタスクとなる。本論文では、電力線通信 (PLC) を用いた、既存のコンセント・プラグの形状変更を必要としない接続機器の自動識別を実現する技術・システムの研究を行った。さらに、その自動識別機能を実現することで、新しい需要制御システムを作り出すことが可能になることも確認する。

従来の PLC は電圧型であるため、プラグから機器識別のための信号を送出しても、どのコンセントや回路遮断機の下位に送信機が接続されているのかを特定することができない。図 2.4 に示すようにプラグから送出される信号は理想的には系統全体に伝わってしまうためである。そのため、例えば、コンセントと回路遮断機に信号受信機を取り付けていても、すべての受信機で識別信号が認識されてしまうことになってしまう。

一方、引き込み方式の電流型 PLC であれば、同様に図 2.4 に示すように、送信機から電源までの閉路に信号が発生する。つまり、コンセントと回路遮断機に信号受信機を取り付けておくことで、そのコンセントや回路遮断機は信号送信源が自身の配下にあることを識別することが可能となる。本研究では、低圧環境向けの引き込み方式の電流型 PLC を提案する。

本来建物は、すべての建物が接続された負荷装置を正しく識別し、制御できるべきである。コンピュータの装置拡張のための仕様である Universal Serial Bus(USB) のように、接続された機器を動的に認識し、ホストシステムから電源や動作を細かく操作可能にするべきである。本研究の目的は、そのような建物を実現するためのあるひとつの道筋を示すことにある。具体的には、建物とコンセント接続装置間の新しい通信手法を提案・評価し、接続機器の識別により有効な需要制御が実現できることを示す。加えて、電流型の電力通信のさらなる応用である太陽光発電などの直流システムでの利用についても示す。

本研究の研究対象とする具体的な想定環境は、建物の 100 V から 200 V の低圧電力系統 (以後低圧環境) である。通常 3000 V から 6000 V の高圧による配電を高圧低圧トランスに入力し低圧環境を得る。この高圧低圧トランスの設置にはいくつかの種類があるが、ここでは商用建物のような建物に 1 つ取り付ける場合と、居住用環境に見られる電柱にトランスを取り付ける場合を考える。本研究で議論する提案システムは、この低圧環境の取り付けられる回路遮断機 (サーキットブレーカー) や、電力計、そして末端に接続される負荷装置間で動作するものである。

第 3 章

単方向電流型電力線通信

3.1 背景

ZigBee, Bluetooth, Wi-Fi, Wi-SUN, 電力線通信 (PLC: Power Line Communication) などの通信技術は, 近年のモノのインターネット (IoT: Internet-of-Things) の研究開発とその事業化で広く利用されている. その中でも大きなアプリケーション領域のひとつとしてエネルギー管理システム (EMS: Energy Management System) が注目されている. EMS においては, スマートタップ・スマートメータや各家電製品が前述のような通信媒体を用いて消費電力情報の収集や機器の管理制御を行っている. EMS では, すべての機器が電力線に繋がっていることから, PLC との相性がとくによいと考えられる. PLC の技術は古くから存在するが, 近年とくに EMS への応用を目指して活発に研究・開発が展開されている. しかしながら, 通信機器の設置場所の特定や長距離伝送が可能な電流に着目した電力線通信の研究は近年ほとんど行われていない.

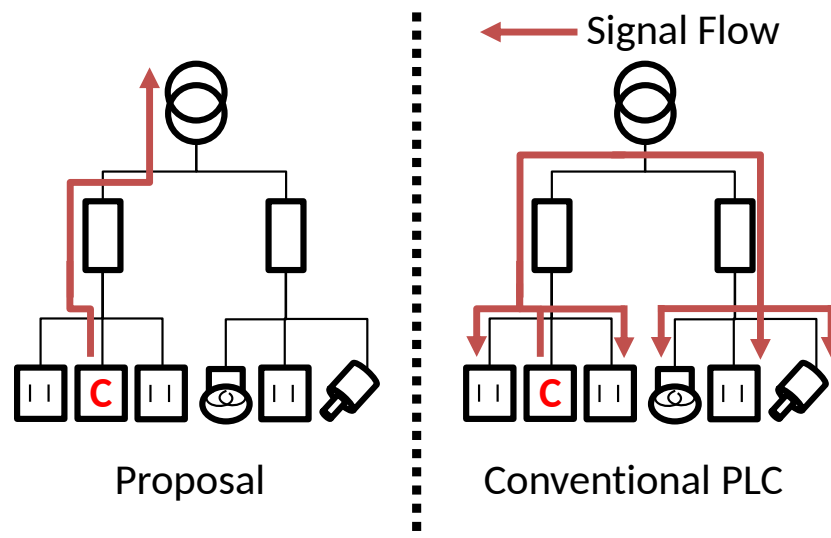


図 3.1: Z3C と従来型電力線通信の信号伝搬の違い

本論文では、低圧の商用電力線の上で電流を使って通信を行う新しい方式、Zero-Cross Current Communication(Z3C)を提案している。提案方式では図 3.1 の矢印に示すように、電源を親 (root) とした木構造で電力線を見た際に、上位方向にのみ信号が伝わる。電流は電源と負荷間のループであり、電源に向かってどこまでも流れる。そのため Z3C における信号は、キルヒホッフの電流則に従い分岐回路の電流と足し合されて伝搬するが、信号電流そのものは電源まで届くことになる。この特性に着目した先行研究として TWACS[19][20] があげられる。TWACS は電流ループを用いる PLC 技術であり、高圧配電網での長距離通信を実現するために開発された。TWACS では 60 から 70 A 程度の電流パルスを用いて 50 bps 程度の通信を実現している。

本論文で提案している電流ループを用いる電力線通信が従来の電力線通信と異なる特徴として、信号伝搬範囲の違いがあげられる。図 3.1 に示すように、電流ループを用いる方式では上位方向のみに流れる。この特性を利用して、枝葉に受信機をつけておくことで、どの枝葉から信号が発生したかを特定することが可能となる。一方、従来の電力線通信では送信した信号は分岐を含めた電力線全体に伝搬されるため、どの枝葉から発生した信号かを特定することができない。提案の Z3C では、この特性に着目し機器識別などに利用する。機器識別では、識別子を送受信するため数百 bps 程度の通信速度が必要であり、またさまざまな機器に内蔵するためには小さな通信回路が必要である。このような要件を TWACS で満たすことは難しく、本論文ではこの問題を解決する方式を提案している。

本章では、Z3C におけるアップリンク通信 (下位に設置した子機から上位に設置した親機への片

方向通信)の基本理論・基礎実験について論じる。Z3Cでは、子機は交流電源電圧の零交差付近において、5 A程度の電流パルスを発生させる。親機は零交差付近における電流パルスを検出することで通信を行う。またパルス幅への符号化を行い、最大 300 bps の通信速度を実現する。

本章は次のように構成される。第2節では、提案手法であるZ3Cに関連した既存の研究を俯瞰する。次に第3節では、Z3Cのアップリンクに関連する技術的詳細を記述する。第4節でプロトタイプシステムを用いた実験と評価結果を述べ、第5節で考察、第6節で本章のまとめを行う。

3.2 関連研究

本研究に関係する研究分野として、電力線通信と負荷機器識別がある。本節では、当該研究領域の方向性を俯瞰し、データ通信に電流を用いる方式として関連性の高いTWACSの解説を行う。

3.2.1 電力線通信と電流ループ

電力線は電気エネルギーを伝送するための線路であるが、この線路を用いて通信を行う技術が電力線通信である。有線上の無線信号 [8] として、線路のモデル化や変調手法等、広く研究開発が進められてきた [39]。それらの研究の成果として、帯域電力線通では IEEE 1901-2010 [24]、狭帯域電力線通信では ITU-T G.9903 [29] (G3-PLC) などの国債標準技術規格も策定された。

これに対し、本研究で提案する方式は、交流商用電源を利用してそこからの電流を引き込む、電流ループを用いた通信であり、原理が全く異なる。従来の電力線通信方式では、通常数百 kHz から数十 MHz といった周波数領域を使用した電圧を通信機から重畳する。そのため、電力線を通信で言うところのバスとみなすことができ、コンセントに通信機を接続するだけで他の通信機と通信ができる環境を構築してきた。

電流ループは電源との間に形成され、このループ上に流れる電流はどの点でも同じであるという特性がある。その特性から長距離通信に用いられることが多く、4-20 mA 電流ループ [40] や RS485 [41] などがその典型的事例として存在する。4-20 mA 電流ループは電流値に値を重畳し伝送する。RS485では、低インピーダンスの終端抵抗を取り付けることで電流を終端抵抗まで引き込み、信号を遠くまで伝えることができる。しかしながら、この特性を用いた電力線通信技術の研究はこれまで十分には行われてこなかった。

3.2.2 負荷機器識別・場所特定

負荷機器の識別や機器の場所特定を実現する技術は、EMSにおける自動的な電力分析を行うために必要となる重要な技術である。これらの技術の必要性の高まりは、近年のIoTの流れに従いコンセント単位での電力計測など、非常に高い密度での計測をEMSで行うようになったことに起因する。当該技術には、主に受動型と能動型の技術があり、とくに受動型の研究は広く行われている。受動型とは、電力データの時系列解析結果から負荷装置が何であるかを予測する技術のことである。Reinhardtらは、負荷装置の消費電力データを1分ごとに取得し、その時系列データから機器の識別を行った[42]。またさらに細かな、電圧・電流・力率のデータを用いた例として加藤らの研究[43]がある。これらの研究では、既設の電力計のデータから機器識別できるという利点はあるが、推定であることから確度に限界があり同じ機器が複数ある時に個々の機器を識別できないという問題が認識されている。

このような問題が発生しない方式として、能動型の手法がある。例えば新しい通信線をコンセントとプラグに追加し、コンセント・プラグ間で通信を行って識別する方式などは能動型である。電気自動車の充電規格ではコンセントとプラグの形状を変更し、新たな物理線を追加している[44]。またSONYはRFIDの通信機をコンセントとプラグに内蔵する認証コンセントを発表した[45]。電力網そのものを変更する方式としては、電力パケットがある[46][47]。電力パケットでは発電元が電力の宛先を電力につけて電力網に入れることで電力がインターネットにおけるパケットのように伝送される。電力パケットでは負荷機器を発電元が指定するため、そもそも負荷機器を明らかにするというタスクを必要としない。

従来の能動的な手法は、電力システムのさまざまな部分を変更する必要があり、変更コストが高い。そこで、本論文では、既設の電力網をそのまま使用できる電力線通信による方法を考える。しかし、前述のように従来の電力線通信の信号はすべてのコンセントに伝搬するため、利用することができない。一方で電流を用いる電力線通信であれば、信号は上位方向のみに伝搬する。このため、例えばコンセントなどの電力線の枝葉に受信機を付けることで、既設の電力網を用いて負荷機器識別を行うことができる。

3.2.3 TWACS

TWACSとは、Makらによって開発された電力線通信技術[19][20]である。電力会社の顧客に設置された電力計の値を自動検針するために開発された技術であり、配電用変電所に設置された親

機と各電力計に設置された子機の間で通信を行う。親機から子機の通信をアウトゴーイング (ダウンリンク) 通信と呼び、子機から親機の通信をインカミング (アップリンク) 通信と呼ぶ。日本においても導入を検討した美齊津らの研究 [48] がある。

TWACS のアップリンク通信では、電圧の零交差点直前から直後にかけて、サイリスタを用いて線路を短絡し 60 から 70 A 程度の電流を発生させ、この電流を親機で読み取ることで通信を実現している。ダウンリンク通信は、親機で同様の短絡を行い電圧に歪みを作ることで実現している。ダウンリンク通信では非常に低い周波数を用いること、アップリンクでは電流ループを用いることで長距離伝送に適した通信方式として提案され、運用されている。

TWACS はサイリスタを用いて線路を短絡することで交流電圧変動に受動的な電流パルスを作り通信を行う。短絡時の電流は線路のインピーダンスによって異なり、厳密に計算できないため、十分な大きさの信号電流を発生し、閾値で信号電流の有無を判定する。そのため、TWACS では原理的に各零交差点でパルスの有無による 2 値 (1bit) しか表現できない。一方、本論文で提案する Z3C ではトランジスタを用いることで能動的に制御された電流パルスを作り出す。その結果、パルス幅を調整することで多値の表現が可能になる。実際に本論文で行った実験では、各零交差点で 8 値 (3bit) の転送を実現した。また低圧環境に着目することで発生するパルス高も 5 A 程度と低くすることができ、通信回路の小型化も可能となった。

3.3 電圧零交差点での電流通信

本節では、Z3C のアップリンク通信原理とパルス幅符号化について述べ、その線路モデルとパラメータに関して解説する。その上で Z3C 装置の設計を行う。

3.3.1 零交差点でのパルス幅符号化

Z3C では交流電圧の零交差点付近を通信に用いる。図 3.2 に示すように、電圧の零交差点付近において、任意幅 T_w の電流パルスが発生させる。このパルス幅 T_w を変えることによって複数の情報を半周期に一度送信する。このパルス幅に多値情報を符号化する手法をパルス幅符号化と呼ぶ。

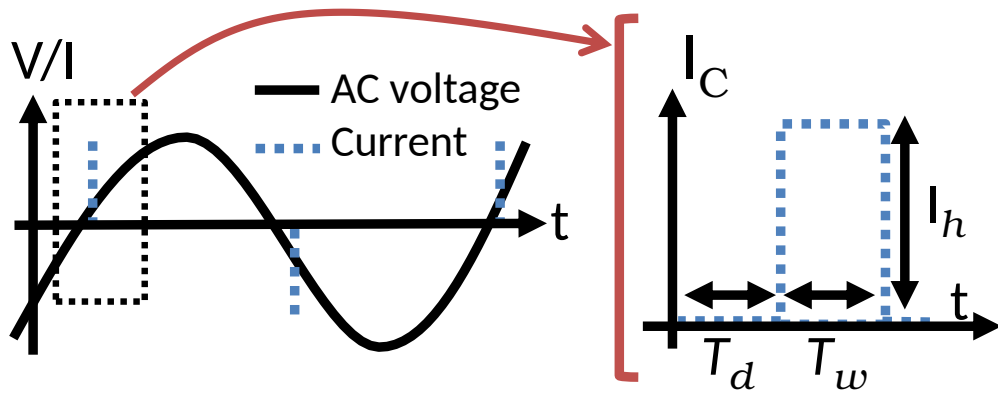


図 3.2: Z3C における電流パルスの波形

理想的な波形の発生時の電圧 V と電流 I を式 (3.1) に示す. このように, 零交差点から T_d まち, I_h の電流パルスを T_w の間発生させる. 波の負区間に入る零交差点では $-I_h$ のパルスを同様に発生させる.

$$V = V_0 \sin(\omega t)$$

$$I = \begin{cases} 0 \\ I_h \quad (T_d < t < T_d + T_w) \end{cases} \quad (3.1)$$

ただし t は $[0, \frac{\pi}{\omega}]$ の範囲とする.

次に多値伝送を行うための, パルス幅符号化について述べる. まず一度のパルスで N 種類の値を伝送することを考える. 具体的には, いまここで N 種類の状態を $\{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ で表すとする. そして, ある状態 s_i に対し, $T_w(s_i)$ 幅のパルスを発生させるとする. ここで s_i に対して $T_w(s_i)$ の値は 1 対 1 に対応していて, T_w は T_{unit} の整数倍である. つまり T_w は,

$$\forall i, j, i \neq j \rightarrow T_w(s_i) \neq T_w(s_j)$$

$$\forall i, \exists k \in \mathbb{N}, T_w(s_i) = kT_{unit}$$

を満たすものとする.

例えば $T_{unit} = 50$ とし, $s_1 = 0, s_2 = 1$ の 2 値を送る場合, $T_w(0) = 50, T_w(1) = 100$ のように T_w を対応づけるとする. 同様に 4 値の場合, $s_1 = 00, s_2 = 01, s_3 = 11, s_4 = 10$ を $T_w(00) = 50, T_w(01) = 100, T_w(11) = 150, T_w(10) = 200$ などとする.

電圧の零交差点付近を用いる理由は 2 つある. 1 つは電力線本来の負荷電流も同様に少ない点, 2 つ目は消費電力を抑えられる点である. 個別の理由について詳しく説明する.

商用電源に接続される負荷にはおおきく分けて、交流電力をそのまま適応できる交流負荷と、交流電力を直流に変換して使用する直流負荷がある。直流負荷では交流直流変換器 (AC-DC コンバータ) を用いて電力を供給する。この交流直流変換器は、零交差点付近においては電流をほぼ発生しないという特徴がある。交流負荷においては、力率の低い機器が存在し、電流パルスと負荷電流が重なるが、交流負荷においては負荷電流波形がなめらかであるため電流パルスをはっきりと識別できる。このように、零交差点付近においては、負荷電流の絶対値が低い・みだれが少ない傾向があり、電力伝送の空白地帯となっていると言える。

次に、2つ目の理由である消費電力を議論する。電流パルスの高さを一定とした場合、電源電圧は低い方が消費電力は少ない。例えば 1 V の時 10 A の電流パルスを 100 マイクロ秒間発生させた場合、消費電力量は 1 mWsec であり、0.1 V の時には 0.1 mWsec となる。

このように、零交差点付近は電力供給における空白地帯かつ電流パルスを用いた時に消費電力を小さく抑えることが可能となる。

3.3.2 実線上の線路モデル

ここでは、Z3C における電気回路の線路モデル (図. 3.3) を解説する。本章で提案する電流パルスを用いた Z3C においては、線路における抵抗が最も重要となる。その理由は零交差点付近で電流を流すことに起因する。商用電源をコンセントで短絡した場合に、取り出すことが可能な最大の電流は線路抵抗によって定まるためである。

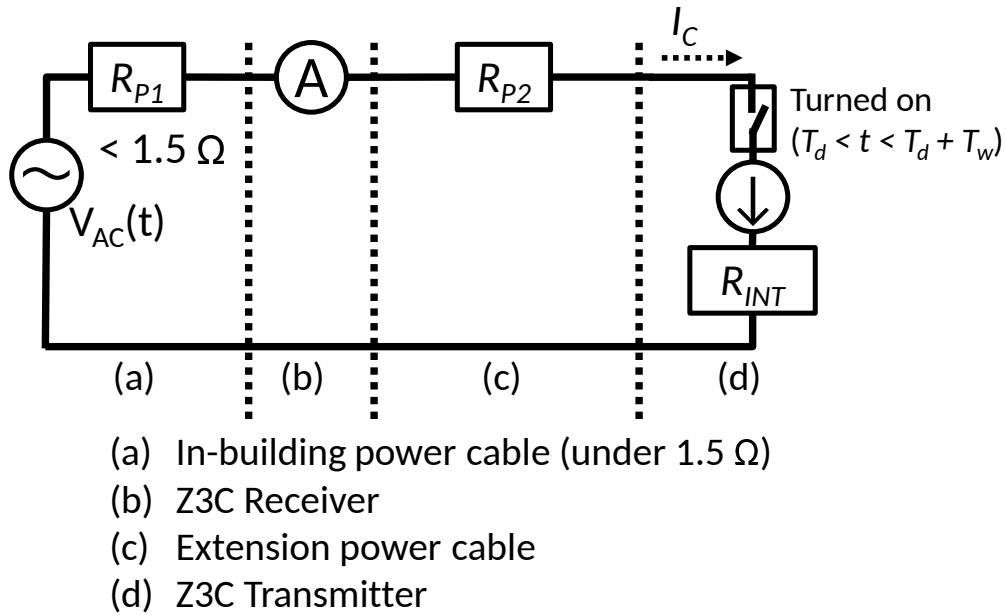


図 3.3: Z3C システムの電気回路モデル

例えば線路抵抗が 1Ω の場合において、 1 A の電流パルスを取り出すためには、交流電源側が 1 V 以上必要であり、 0 から 1 V までの間はパルスの発生を待つ必要がある。そのため、線路抵抗 R_{P1} と電流パルスの高さ I_h が、遅延時間 T_d を決定することになる。

線路抵抗は図. 3.3 における、 R_{P1} 、 R_{P2} と R_{INT} の 3 種類からなる。 R_{P1} はコンセントまでの線路抵抗である。日本のような交流 100 V の場合、電圧は $\pm 10 \text{ V}$ に収まる必要があるため、コンセントでの最大電流 15 A を流した場合でも 10 V の電圧降下となるように線路抵抗は設定する必要があるため通常 1.5Ω 以下である。次に R_{P2} であるが、これはコンセントから送信機までの線路抵抗であり事前に予想することは難しいが、最大でも 1Ω 程度であると考えられる。また、 R_{INT} は送信機の内部抵抗であり、送信機の実装による。

ここで、線路モデルを数式で表現する。まず送信機にかかる電源電圧 V_{AC} を時間 t に関する関数として、式 (3.2) のように定義する。ここで、 V_{sys} と f_{sys} は電源電圧と周波数であり、日本の関東圏では 100 V と 50 Hz である。

$$V_{AC}(t) = \sqrt{2}V_{sys} \sin(2\pi f_{sys}t) \quad (3.2)$$

ただし t は $[0, \frac{1}{2f_{sys}}]$ の範囲とする。

前述のように、線路抵抗によって送信機が電源から引き込む電流は制限されるためパルス発生時の引き込み電流 I_C は式 (3.3) のように I_h か、電圧と線路抵抗から求まる最大電流のどちらか小さい方となる。

$$I_C(t) = \begin{cases} 0 \\ \min \left\{ \frac{V_{AC}(t)}{R_{INT} + R_{P1} + R_{P2}}, I_h \right\} (T_d < t < T_d + T_w) \end{cases} \quad (3.3)$$

つまり、定電流源による制御された電流 I_h を得るためには、零交差点からの待ち時間 T_d を適切に設定する必要がある。この最適な T_d を式 (3.2), (3.3) から導出したものが式 (3.4) となる。この式で得られる値を T_d に設定することで、送信機は I_h のパルス高をパルス発生時から得ることができる。

$$T_d \geq \frac{1}{2\pi f_{sys}} \arcsin \left(\frac{R_{INT} + R_{P1} + R_{P2}}{\sqrt{2} V_{sys}} I_h \right) \quad (3.4)$$

単位パルス幅 T_{unit} は受信機のサンプリングレート f_{samp} によって定まる。本章では許容するパルスのエラー幅を 40% とするために、式 (3.5) を満たすパルス幅を、最小単位として用いた。この T_{unit} の整数倍を用いてパルス幅符号化を行う。

$$\begin{aligned} T_{unit} &\geq \frac{1}{f_{samp}} \times 2.5 \\ T_w &= NT_{unit} \end{aligned} \quad (3.5)$$

一方、電流パルスを送信するにあたって、電源電圧は時間と共に増加して行く。通信に用いてよい電力についても、 T_w や I_h を定める重要なパラメータである。消費電力を算出するための計算式を式 (3.6) に示す。

$$W_{com} = \int_{T_d}^{T_d + T_w} I_C(t) V_{AC}(t) \cdot dt \times 2f_{sys} \quad (3.6)$$

3.3.3 送受信機的设计

零交差点で電流パルスを発生させる定電流回路と電線に流れる電流を計測する回路を設計した。送信機の回路ブロックを図 3.4 に、受信機の回路ブロックを図 3.5 にあげる。受信機では検出した立ち上がり・立ち下がりエッジが規定パルス高の 70% を超えている時にパルスと認識する。

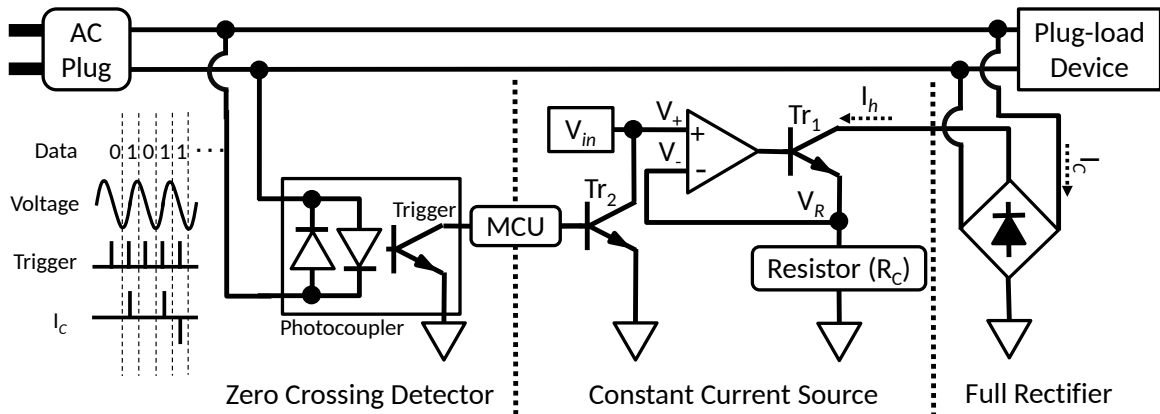


図 3.4: Z3C の送信機

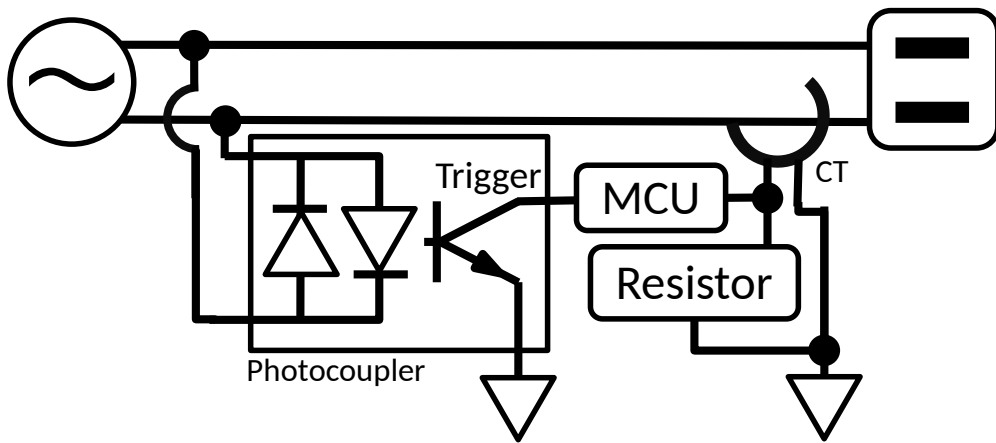


図 3.5: Z3C の受信機

送信機の主たる部分は、引き込み型の定電流源回路である。トランジスタを制御し、負荷を変動させることで電源電圧にかかわらず一定の電流を発生する。 V_{in} 、 V_+ 、 V_- と V_R はそれぞれ入力電圧、オペアンプのプラス電圧、マイナス電圧、そしてオペアンプの出力電圧である。オペアンプはプラス電圧とマイナス電圧が等しくなるように出力電圧を制御する。つまり、 $V_{in} = V_R$ となるように制御される。その結果 $I_h = V_{in}/R_C$ となり、電源電圧にかかわらず定電流を流すことが可能となる。

マイクロコントロールユニット (MCU) は、この定電流回路を制御することで、任意幅のパルスが発生させる。MCU は Tr_2 を制御することで V_+ をゼロにすることができる。これによって、定電流回路の動作を制御可能であり、任意幅のパルスが発生可能である。商用電源に接続された、フォトカプラを用いた電圧零交差点検出回路からの入力をトリガとして電流パルスが発生する。

電圧零交差点検出回路は交流用フォトカプラを用いている。電圧が低くなった零交差点付近において、交流用フォトカプラ内の LED が消灯するため、出力トランジスタがオープンとなる。フォトカプラの出力をプルアップしておき、零交差点を検出する。

受信機は電流トランス (CT), MCU, 送信機と同じ電圧零交差点検出回路からなる。零交差点のトリガを受けて、MCU が電流トランスから値を得てメモリに記録する。そのあと電流パルスが含まれるか確認する。電流パルスの検出にはエッジを用い、エラーが 3 割未満の立ち上がり・立ち下りのペアを電流パルスとして認識する。

送受信機と通信制御用のコンピュータ間のインタフェースには USB-TTL シリアルインタフェースを用いる。通信速度は 115200 bps とする。受信機は 10 ミリ秒間隔 (半周期に一度) で、検出したパルスの幅を送信する。もしも検出できなかった場合や検出に失敗した場合にはエラーコードを送信する。送信機はコンピュータからパルス幅の指示を待ち、受信すると次の零交差点でパルスを発生する。その後、送信完了をコンピュータに伝える。そのため各零点で連続的にパルスを発生するためには、コンピュータは次のパルス発生までの待ち時間 (5 から 8 ミリ秒程度) に次のパルス幅を送信機に送信する必要がある。

送受信機とコンピュータ間のフレームフォーマットは開始記号 1 バイト、データ 1 バイト、チェックサム 1 バイトの計 3 バイトである。開始記号には 0xaa を用いている。データはパルス幅で、チェックサムにはデータと同じ内容をもう一度入れる。パルス幅は 4 マイクロ秒単位で設定し、単位パルス幅 T_{unit} 以下の値にエラーコードを割り当てている。

3.3.4 電流パルスによる漏えい電磁界

電力線通信において、PLC 信号による漏えい電磁界がおおきな課題であり、多くの議論が行われてきた [49][50]。本節では提案手法において、この漏えい電磁界が極めて発生しにくいことを示す。

PLC における漏えい電磁界とは、PLC のモデムが電源線に流す信号電流がコモンモードであるときに発生する。通常 PLC 信号は 2 本の電源線上にディファレンシャルモードで流れる。そのため信号電流により生れる電磁界は互いに打ち消される。しかしながら、電源を末端側に配置する従来の電圧型 PLC では、並列回路すべてに信号が伝わる。そのため、並列回路の配線方法や負荷装置の内部設計により、信号電流による電磁界が打ち消されず、漏えい電磁界が発生する。このとき信号電流はコモンモードであり、これをモード変換と呼ぶ。このモード変換を抑えることは電源線の性質上非常に難しく PLC 普及における長年の課題となってきた。

一方，提案手法では，PLC のモデムは商用電源から与えられる電力を消費する純粋な抵抗負荷であり，信号電流は他の並列回路に流れない．この特徴から従来の電圧型 PLC が抱えていた漏えい電磁界の問題を原理上持たないことになる．

3.4 実験・結果

本節では，提案した Z3C についての実験結果について報告する．実験はプロトタイプを開発し，提案している通信原理やモデルについて検証した．また通信機的设计についても評価した．

3.4.1 実験設定

実験は図 3.6 に示すような接続を用いて行った．送信機と受信機の上に延長ケーブル (R_{P2}) を複数準備し，受信機を直接壁面のコンセントに接続した．実験を行った建物は東京大学 本郷キャンパス 工学部 2 号館で，実験室は 10 階である．また送信機を壁面コンセントに直接繋いだ際の送信機から見た配線抵抗 (R_{P1}) は 0.7Ω であった．

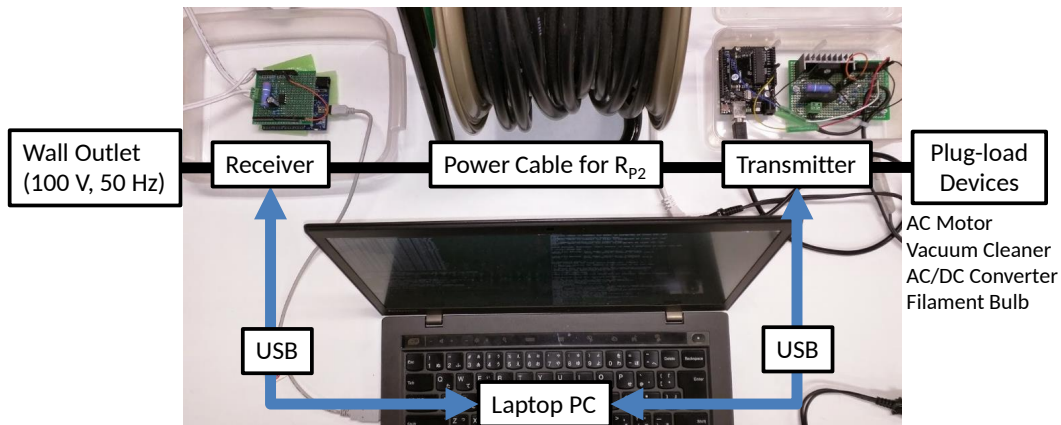


図 3.6: 実験設定

送受信機の実装においては，表 3.1 に示すような部品を用いている．本実装においては，送受信機に用いた MCU の性能から T_{unit} を 40 マイクロ秒・8 値 (3bit) を 1 パルス (40 マイクロ秒から 320 マイクロ秒の幅) で送信するとして実験機を開発した．通信速度は 300 bps となる．

表 3.1: 実験用の送受信機実装

(a) Receiver

| | |
|-----------------|--|
| MCU | ATMEL ATmega328P, 16MHz, 2KB SRAM |
| ADC | MCU internal, 60 kHz |
| Current sensing | CT, U _{RD} CTL-10-CLS |
| Burden resistor | 1 k Ω |
| Voltage sensing | Fairchild Semiconductor FOD814A300W |

(b) Transmitter

| | |
|----------------------------|---|
| MCU | ATMEL ATmega328P, 16MHz, 2KB SRAM |
| Voltage sensing | Fairchild Semiconductor FOD814A300W |
| Constant current source | HTC LM358N, TOSHIBA 2SC5200, 2SC3421 |
| R_C | 0.39 Ω |

送受信機間は JIS C 8303 規格のコンセント・プラグを用いて接続しており、ケーブルは JIS C 3342 準拠の導体径 1.6 mm ケーブルである。各送信機受信機で、15 cm づつケーブルを使用している。これらの線抵抗と送信機の内部インピーダンスが R_{INT} を構成しており、1.3 Ω である。

送信までの待ち時間 T_d とパルス高 I_h は、送信機を直付け ($R_{P2} = 0 \Omega$) した場合の抵抗値を使い、式 (3.4) により計算して 250 マイクロ秒と 5.5 A とした。

3.4.2 送信機・受信機設計の評価

まず、引き込み方の定電流源を用いた電流パルス発生回路のパルス発生特性の評価を行った。長さの異なる 3 種類の延長ケーブル、4 m (0.10 Ω), 60 m (0.64 Ω), 100 m (0.98 Ω) を用いて、280 マイクロ秒のパルスを発生させ、配線抵抗による立ち上がりエッジの鈍化を図 3.7 のように確認

した。

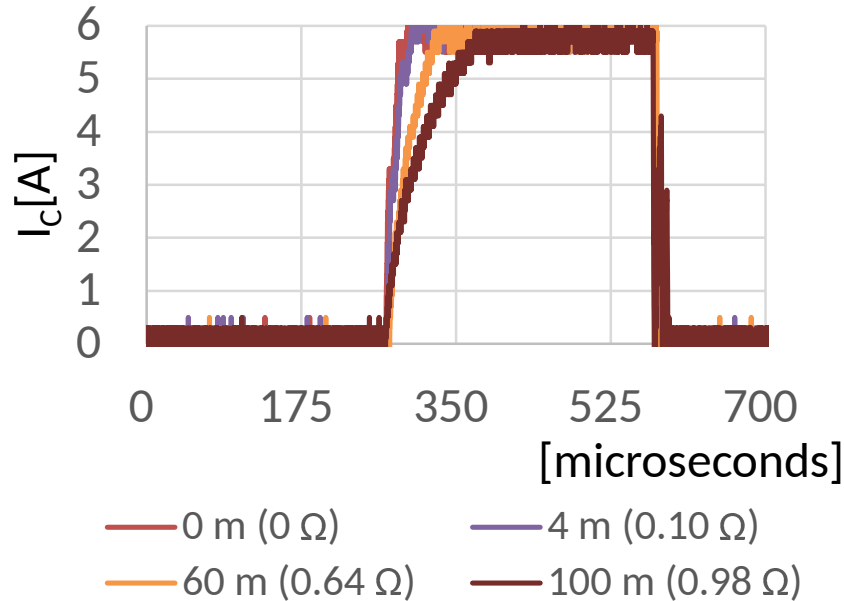


図 3.7: 抵抗値別の電流パルス波形

図が示すように配線抵抗をあげることでパルスの立ち上がりがなだらかになって行くことが確認できる。配線インダクタンスから発生するだろうオーバーシュートやアンダーシュートは 100 m のケーブルを用いた際に確認できる。しかしながら、電流パルス全体の長さからすると無視可能であるとわかる。

次にパルス幅符号化を行った各値を送信しながら、100 回重ねがいた時のアイパターンを図 3.8 に示す。十分に広い目があることが確認できることから、安定してパルスが発生できていることがわかる。電流パルスが発生させるにあたっては、パルスの立ち上がり・立ち下りがどの程度のスピードで行えるかが重要になる。本実験の結果から、数マイクロ秒程度で数 A 程度の急峻な立ち上りが可能なことがわかる。また筆者が試した他の建物でも同じような特性がみられた。つまり、商用電源のインダクタンス・キャパシタンスによるパルスの立ち下がり・立ち上がり時間については、提案手法で用いるような数十マイクロ秒から数百マイクロ秒の電流パルスでは無視できる。

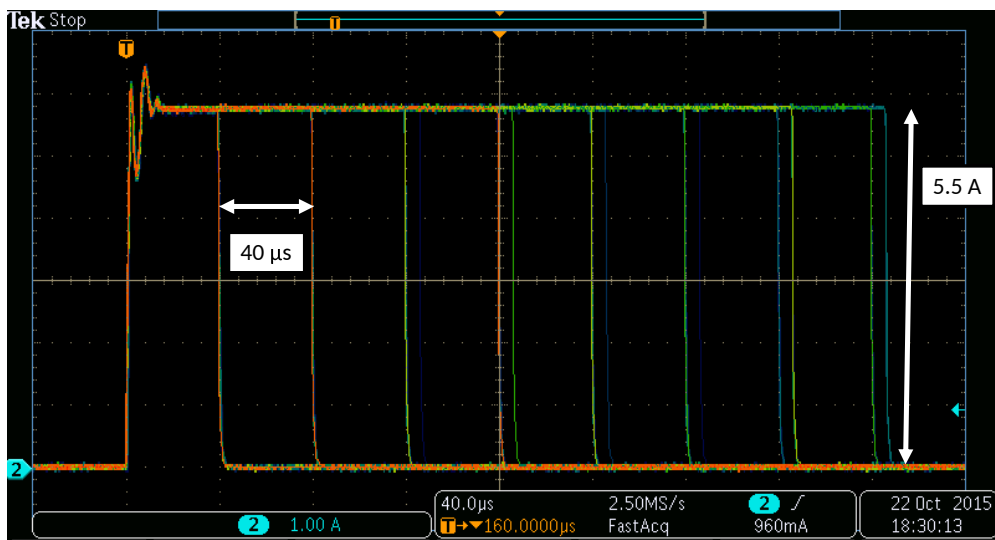
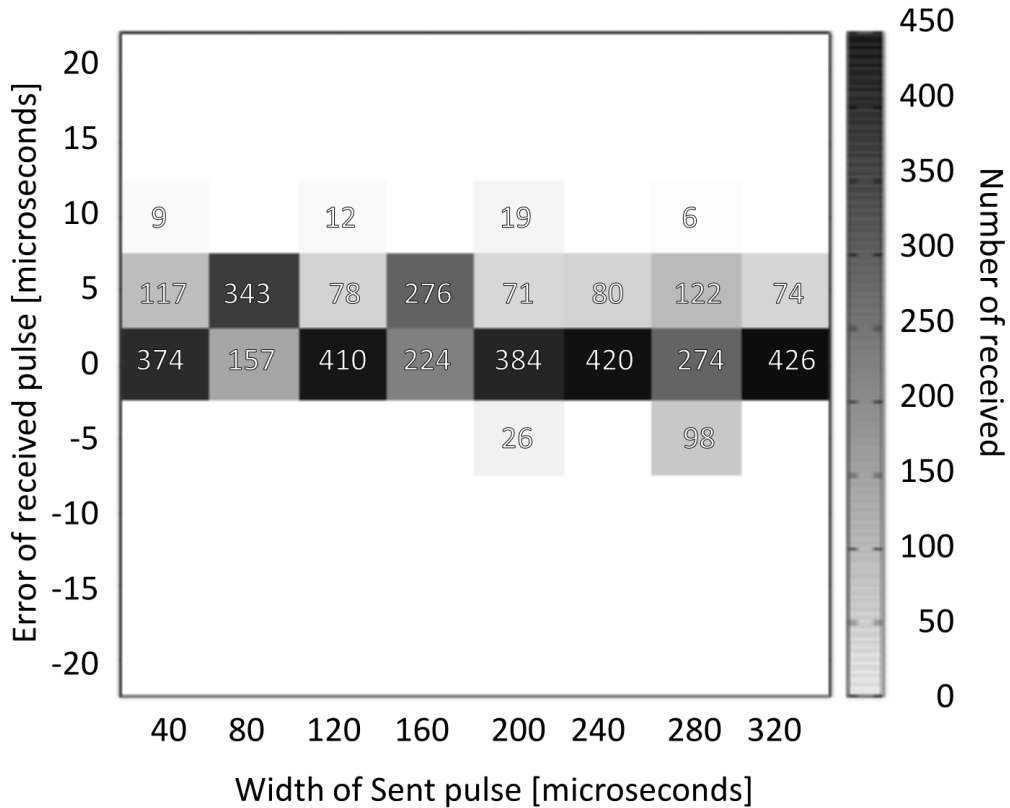


図 3.8: パルス発生の重ね描きによるアイパターン

次に受信の特性評価を行った。送信機から図 3.8 と同じパルスを 500 回送信し、受信機で受けてパルス幅の誤差を測定した。その結果を図 3.9 に示す。縦軸がエラーで、横軸が送信したパルス幅である。また各枠内には受信回数を示している。

図 3.9: 送信パルス幅 T_w に対する受信エラー量

この受信エラーについては、前述のようにサンプリングレートにより発生する。今回の 60 kHz で発生しうるエラー 16 マイクロ秒以下となっており設計と一致する。またパルス幅が変わってもエラーの幅が変わらないことから、サンプリングによる一定量のエラーと考えることができる。

3.4.3 ノイズに関する評価

提案手法におけるノイズとは負荷機器そのものが流す、零交差点付近での電流である。そこで今回用意した 4 種類の負荷装置のノイズ (負荷電流) と送信機の信号を比較した。零交差点から 60 kHz で 100 回サンプリングを行い、各サンプル値の前後差分値をとりエッジ高とする。送信機の信号とノイズのエッジ高間に差が十分であることを示す。ここでは、図 3.10 のように 4 種類の負荷装置と送信機での電流振幅差のヒストグラムを用いて比較を行った。また右端の ALL とはここにあるすべての負荷装置を同時に動かして計測した負荷電流ノイズである。X 軸の値は検出回数であり、Y 軸の値はエッジ高である。また Y 軸の値は MCU の ADC の読み値で量子化されて

いる。(幅はおおよそ $0.044 \text{ A}/\Delta t$)

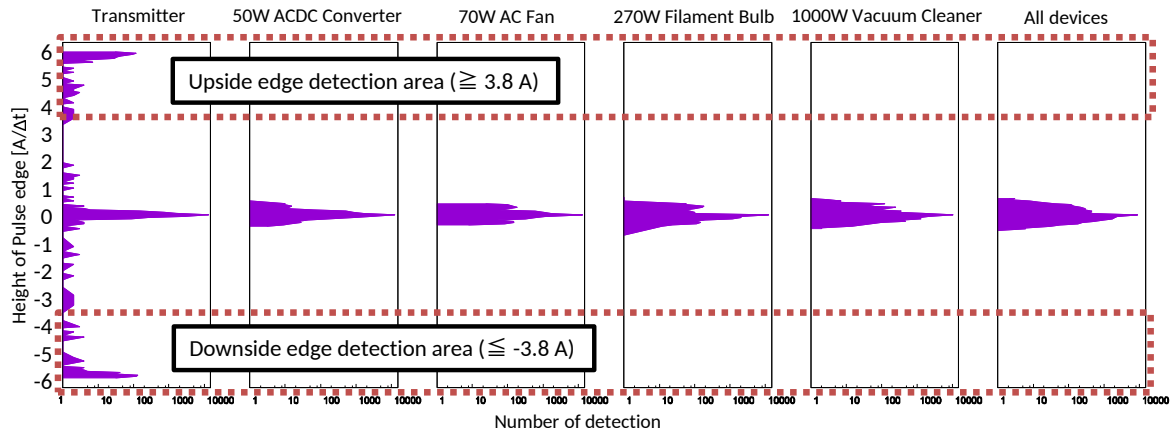


図 3.10: 検出エッジ高のヒストグラム

図 3.10 のように、送信機の発生する電流パルス高である 5.5 A 付近にピークが確認できる。また他の負荷装置のピークが十分に低いことも確認できる。70% の高さで検出を行うため立ち上がり・立ち下がり検出範囲には送信機のパルスしか入らず十分に弁別可能である。AC-DC コンバータは電圧のピーク付近では鋭い電流パルスが発生するが、零交差点付近では電流を発生しない。そのため、理想的にはパルス高 $0 \text{ A}/\Delta t$ のみが検出される。実験結果には受信機の AD 変換結果の揺らぎが現れている。その他の機器については、零交差点付近の電流が穏やかに変化しているため、検出されるパルス高は低い。

また、各負荷の消費電流と送信機の信号を重ねあわせたグラフについて、図 3.11 に示す。エッジ検出区間を矩形で囲んでいるが、そのグラフからも負荷電流に対して十分な高さの電流を発生できていることが確認できる。

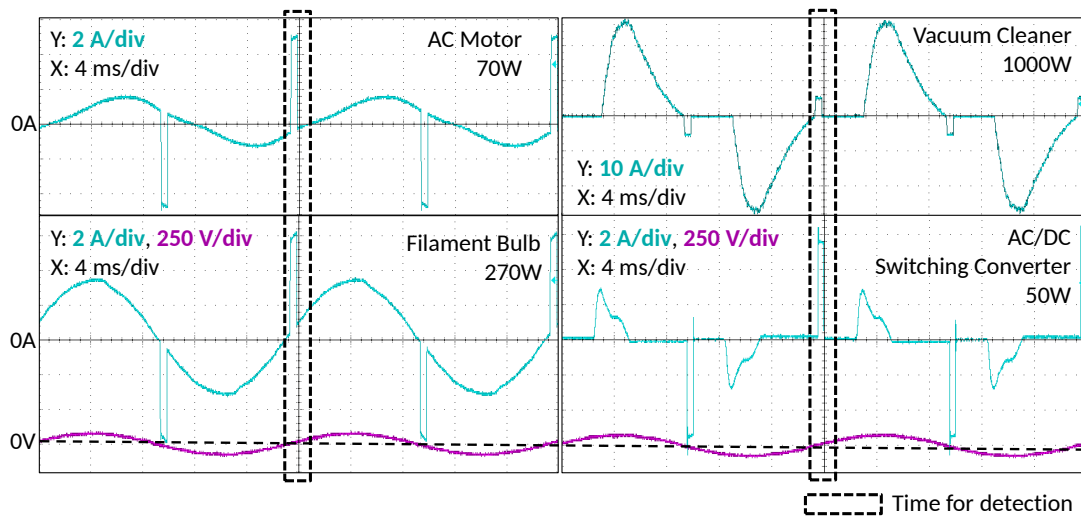


図 3.11: 各負荷装置の消費電流と送信機の電流パルス

図 3.11 は本実験で用いた 4 つの負荷装置の消費電流に、送信機が発生する電流パルスを重ねあわせたものである。十分に検出しやすく、高い電流が発生していることが確認できる。図中のエッジ検出域でのエッジ高さをプロットしたものが、図 3.10 である。

加えて、他の装置においても問題が無いことを確認するために外部の研究用データセット PLAID[51] を用いた評価を行った。このデータセットには全 1074 回の負荷装置の電圧と電流を 30 KHz でサンプリングした計測値が含まれている。本章ではこのデータセットに含まれる 11 種類、空調装置、卓上蛍光灯、扇風機、冷蔵庫、ヘアドライヤー、ヒーター、白熱電球、ラップトップ PC、電子レンジ、掃除機、洗濯機、の計測結果を用い評価を行った。前述の評価と同様にパルス検出域でのエッジ高さを評価したところもっとも大きいものでヒーターの 1.3 A のパルスが検出された。これは今回用いた 3.8 A というパルスの検出域と比べて低い値であり、提案手法の有効性を支持する結果である。

3.5 考察

本節では、実験結果の考察を行い、今後の課題を整理する。

3.5.1 従来手法での実現との比較

本章で提案してきた Z3C で、その対象とする負荷機器の自動識別を実現するとき、従来からある電流型の電力線通信である TWACS で実現した場合との比較を行う。TWACS は高圧環境向けの実装しか行われていないため、仮に低圧環境に用いた場合にどのような実装になるかを議論する。

表 3.2 に比較をまとめる。TWACS と Z3C のおおきな違いとして通信速度があげられる。TWACS では一度のゼロ交差点で 1 ビットの情報を送信することが限界であるのに対して、Z3C では 3 ビットを実現した。この値は機器挿抜時に機器の識別情報を送るとして、識別情報を 1 秒以下で送信完了すべきであると言う要件を満たすために重要になる。識別情報としては、インターネットで用いられる IPv6 アドレス、128 ビットを想定した。

表 3.2: 提案手法と従来手法の比較

| | TWACS | Z3C |
|--------------|-----------------------|--------------------------|
| 通信速度 | 1 bit/halfcycle | 3 bit/halfcycle |
| 通信による消費電力 | 0 Wsec/halfcycle | 約 5 mWsec/halfcycle |
| 電流発生部品の物理サイズ | 27 mm * 27 mm * 15 mm | 2.3 mm * 2.3 mm * 6.1 mm |

次に装置の消費電力の比較を行う。TWACS ではコイルを用いて電流を発生するため、この電流による電力消費が原理的に発生しない。一方で Z3C では抵抗を用いるため、この電流により熱が発生し電力を消費する。しかし、Z3C の消費電力は一度のパルス発生につき平均 5 mWsec と非常に小さい。つまり常にパルスを発生している場合であっても、60 Hz の環境で 600 mW となり一般的な PLC モデムの消費電力である 5 W 程度と比べて小さい。また負荷装置識別のタスクでは信号の送信は、128 bit であれば 43 回のパルス発生で送信できるため、215 mWsec/identification となり、同様に小さく、この値は自動識別においては無視できる大きさとなっている。

この消費電力の議論に起因して、通信装置の実装サイズの差が発生する。ここでは本章で用いてきた 5 A のパルスを仮定し、TWACS の電流発生用コイルを選定した。5 A を発生するコイルではその物理サイズが大きくことなり、体積で比較すると実に約 300 倍の違いとなる。Z3C の通

信機はコンセントに挿抜するプラグの内部に実装することが最終的には目標であるため、TWACSは物理的な装置の大きさの観点から適用が不可能な方式となってしまう。

3.5.2 高速化の可能性

本手法では一度のゼロ交差点に8値、3ビットを重畳したが、図3.8に示すように、パルス幅とパルス高にさらなる重畳が可能であろうと考えられる。具体的には、図から見た考察ではあるが、少なくとも10マイクロ秒単位でのパルス幅の分離、そして、1A単位でのパルス高の分離が可能である。その場合、単純にパルス幅とパルス高の符号化を用いると、パルス幅が40通り、パルス幅が5通りであり、200種類の値を1パルスで伝送できる。

また、今回パルス幅に重畳したが、一度のゼロ交差で複数のパルスが発生させることも可能である。そのようにパルスを拡張することにより、現状の40マイクロ秒と5Aのパルスであっても8bit/halfcycle、256種類の値を表現可能である。

本章の目的は、低圧環境における抵抗負荷を用いた電流による電力線通信の有効性の確認であったため、性能については細かく検討しなかった。そのため本章の実装では、MCUの性能上の制約や回路設計上の課題などから8値を1パルスで伝送したが、実験結果により、非常におおきな性能向上が見込めることが明かになった。

3.5.3 電力線上での電流ループの可能性

実験結果により、5A程度の電流パルスを零交差点付近に発生させることによって、通信が行えることが実証できた。またパルス幅符号化を用いることで電流パルスによる多値伝送が可能であることも確認できた。図3.10の全機器を足し合せた結果により、零交差点付近に高い電流パルスを発生させることで、検出が容易なパルスが発生できることも確認できた。また、力率100%の機器を考えた時に、数Aの電流値が零交差点付近に生れるということはピークでは数十Aの電流が流れるということで、送信機のような機器は通常存在しえないと考えられる。

しかしながら商用電源で用いられる200V-6600Vの昇圧トランスを通過する場合には、電流値が1/33となり、さらに他の機器の電流も追加される。この場合についての実験・考察はできていないため、今後の課題となる。

3.5.4 引き込み型定電流源による電流パルスの発生

提案手法では、引き込み型の定電流源を用いて電流パルスを発生した。実験により、本設計で十分急峻な電流パルスが発生可能であることが確認できた。また受信機についても、発生したパルスを受信できることが確認できた。このことは提案手法の現実的な実装が可能であるということを表し設計の正しさを示すものである。

しかしながら定電流源の構成では、半導体スイッチと制御抵抗を電力線に直列接続するという構成を取るため、電圧が低い時に電力線の配線抵抗によって取り出せるパルス高が制限される。そのため制御抵抗を取り払った半導体スイッチのみで定電流源を構成するような実装が今後重要になると考えられる。

3.5.5 今後の課題

今後の課題として特に重要なものは、大規模伝送モデルの研究があると考えられる。本論では、ビル内の電力線や、昇圧トランスなど電力網全体のことは考慮しなかった。しかしながら電流信号の性質上、コンセントと送信機の間でやりとりされたエネルギーの移動は、ビル内部の電力線や配電網全体でも発生していると考えられる。これらの信号は場合によっては変電所から需要家までといった非常に長い距離でも伝送されていると考えられ、自動検針などに用いることが可能な長距離通信技術になりえる可能性がある。

同時にこの特性は、同じ電力線内で複数の送信機・受信機ペアを配置する時に混信が発生する可能性があることも示しており、今後の課題として検討する必要がある。

3.6 まとめ

本章では、電流パルスを商用電源から引き込むことで通信を実現する Z3C を提案した。提案は商用電源の下位におく送信機から上位の受信機までの単方向の通信であり、その通信について原理を述べ、送受信機の設計を行った。また実際に設計にあわせて実装を開発し、それを用いて動作の検証を行った。昇圧トランスを含んだ大規模伝送モデルの必要性などの課題が存在するが、提案する電流ループを用いた電力線通信 (Z3C) が実現できることは確認できた。提案する Z3C は商用電源で電流ループによる閉じた通信を実現でき、さまざまなアプリケーションでの利用が期待される。

第 4 章

双方向通信への拡張

4.1 背景

スマートメータはスマートグリッドにおいて非常に重要な要素の 1 つであり、実際に世界中で数多くの配備が現在行われている。スマートメータとは通信機能を持った電力計測装置であり、通信機能側から計測結果を取得したり、内部のスイッチ制御ができるものである。スマートメータによって、検針員が各戸を 1 軒 1 軒点検して周るといった計測に必要なコストが必要でなくなる。このようなスマートメータを用いた広域での計測システムの研究は Automatic Metering Infrastructure(AMI) や Automatic Meter Reading(AMR) などと呼ばれ活発な研究開発が行われている。またさらなる消費電力削減のために狭域のスマートメータの配置についても研究開発が進んでおり、実証実験レベルでは、すべてのコンセントにスマートメータを配備する建物 (スマートビルなどと呼ばれる) の試みも存在する。

スマートメータの運用では負荷装置の識別作業が必要となる。負荷装置の識別作業とは、スマートメータが計測している対象が何であるかを同定する作業である。通常の AMI や AMR では、スマートメータを建物に 1 つ取り付けるような運用が主で計測値を元に電気代を請求するような運用であるため、「どの契約者の家か？」というレベルの識別が必要となる。スマートメータをより細かい粒度で配置した場合、このコンセントにはテレビが繋がっているであるとか、冷蔵庫が繋がっているであるなどの、より細かい粒度での負荷装置の識別が必要となる。これらの細かい負荷装置の識別が可能になれば、より細かい消費エネルギーの診断など新しい応用が可能となる。しかしながら、これらの識別は今日でも手作業で行われてきている。計測機器の運用者は、それぞれの計測器が担当・収容している負荷装置が何であるかを手動で記録し対応付けしてきた。そのため、この手動による設定は、非常に時間がかかりコストがかかる上に、モバイル装置など一部の負荷装

置では動的に接続箇所が変わることから対応することができなかった。

そのような状況から、前章までに述べてきたように、自動的に負荷装置を識別する Automatic Appliance Identification という技術が強く求められており、スマートグリッドの研究領域では非常に活発な研究分野となっている。本論文で提案している負荷装置識別方法の根幹となるアイデアは、電力線通信を用いて識別子をスマートメータと負荷装置間で交換するというものである。電力線通信 (PLC: Power Line Communication) は、よく知られたコモディティ化された技術であり、電力線を用いてデータ通信を行う。しかしながら従来の PLC は信号伝搬範囲の関係から、自動負荷装置識別という用途には向いていない。従来の PLC、例えば NB-PLC や BB-PLC では、信号を電圧の周波数領域に重畳するため、信号伝搬の範囲を制御することができない、信号は並列接続された回路へ伝搬し、信号減衰がない理想的な環境では建物全体に伝搬してしまう。そのため、スマートメータが全てのコンセントについていたとして、あるコンセントの下位に接続された装置が PLC で識別子を送信したとしても、すべてのスマートメータで受信してしまい、どのスマートメータの下位にあるかを特定することができない。そこで、ここでは電流に着目したシステムを提案している。電流の流れ電源と負荷の間でのループを形成し、この電流に信号を重畳することで、この信号の伝搬範囲を回路の上流方向のみに制限できる方式を提案している。

前章で述べたように、電流を用いた PLC を実現するために、AC 電圧が正弦波であることを利用した。電源電圧にゼロ交差点が存在するため、このゼロ交差点付近を用いて電流信号を発生させる。ゼロ交差点付近で、回路をショートすることで電流パルスが発生する。本論では、数十から数百マイクロ秒程度かつ数アンペア程度の電流パルスが発生する。ゼロ交差点では電圧も同様に低いため、回路ショートによって消費される電力も少くすることができる。この電流パルスをコンセント側からスマートメータへの通信とする。これが上り方向、図 4.1 の赤色で示した方向の通信であり、前章で詳しく解説した。この上り方向の通信は従来の PLC と異なり、回路の上位方向のみに伝搬する。

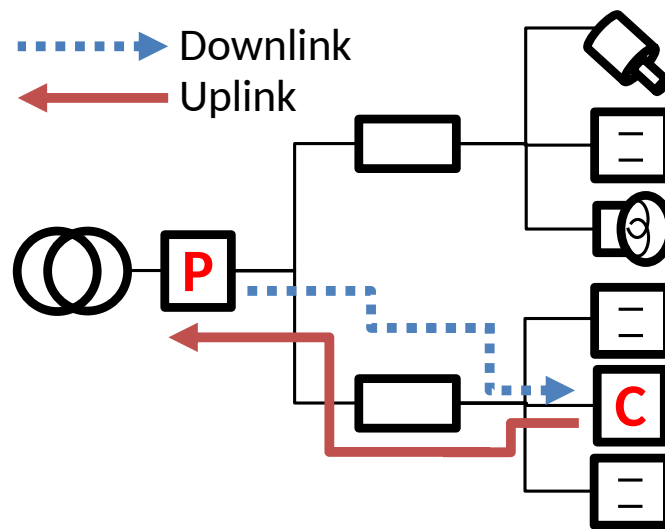


図 4.1: 信号方向の定義

本章では、新たに“電流ブロック”と呼ぶ新しい手法を提案し、この電流ブロックで逆方向、すなわちスマートメータから負荷装置への下り方向の通信を実現する。図 4.1 の青色で示す方向の通信である。既存の UNB-PLC における下り方向の通信とくらべて、この方法では親機の大きさを小さくすることができるという利点があり、これは親機の機能をスマートメータ内に内蔵する用途に適している。

本章は次のように構成される。まず第 2 節で関連研究を俯瞰し、PLC と電流ループを用いる通信の研究活動についてまとめる。第 3 節で、提案手法である電流ブロックを用いた通信について述べる。この節では双方向通信、さらに多数の通信装置での通信を実現するための媒体アクセス制御手法も述べている。第 4 節でプロトタイプ実装と、実験、さらにその結果について論じる。

4.2 関連研究

本研究は、電流ループを用いた通信を PLC に応用するというものである。電流ループを用いた通信は、電気を用いた通信の最初期から使われている方法でありその歴史は長い。物理的に非常に単純な動作原理であるため、学術的な観点から語られることはあまり多くない。本節では、まず電流を用いる通信に関する技術について述べ、その後 PLC についての議論を行う。

4.2.1 電流を用いた通信

電流を用いた通信には、長距離通信とノイズ耐性の強さという2つの特徴がある。この特徴は電気回路の理論で知られているように、電流は電源から負荷を通して電源に戻るそのループの上でどの点でも同じであることに起因する。電圧を用いた信号とちがって配線が持つ抵抗成分によって信号の減衰などが発生しない。図4.2に最も基本的な電流を用いた双方向通信を示す。通常は両方のスイッチがONであり、電流が流れている。スイッチは通信装置1(親機)と通信装置2(子機)とする。子機が信号を送るためにスイッチをOFFにすると電流が流れなくなる。親機ではこの電流の有無でパルスを認識できる。子機が自分側のスイッチをOFFにしていなくてもかかわらず電流が流れていないとき、これを相手側、親機、が信号を送っていると認識できる。このような仕組みは最初期の電信で使われていた。

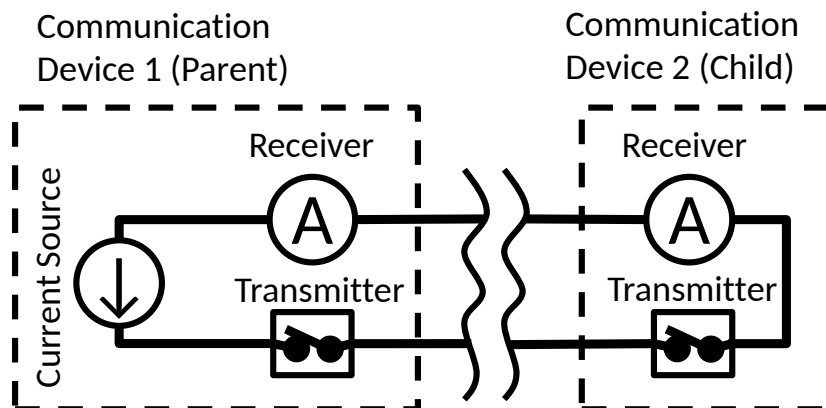


図 4.2: 電流ループを用いた双方向通信システムの模式図

アナログ電流ループは工場や農園など計測値が非常に重要な計測システムでよく知られ、使われている手法である。おおくの工場で4-20 mA と呼ばれるアナログ電流ループ [40] が、各種バルブの開放量や温度などセンシングのために使われている。4-20 mA とは、4 mA を最低、20 mA を最高として、センサの値をこの間の電流値で表す手法である。前述のように電流ループは減衰しない特性があるので、正確な値を電気で送る用途においてよく使われてきた。4-20 mA の上でアナログ値ではなく、データ通信を実現するための技術として HART [52] があるが、これは電流型ではなく、電圧型の電力線通信である。

RS485 [41] もまた、4-20 mA アナログ電流ループと同じ場面でよく使われる通信技術である。RS485 は電圧信号を用いるが、電流の特性を用いている。終端抵抗と呼ばれる抵抗を RS485 配線

の最初と最後に取り付けることで、RS485 の電圧信号を電流にのせてバス上の端から端まで伝える。このように終端抵抗を取り付けることで、並列回路上に接続された RS485 の通信装置全体に信号を双方向に伝搬させる。

電流を用いた通信は、専用の電線・配線を用いる。従来の電流を用いた通信技術のもので、従来の配線や従来のシステムに、新しくその機能を追加することができるものはない。本論で提案していく電流型の通信は、既設の交流電力系統につかわれている電力線を用いて電流を用いた通信を実現できる。

4.2.2 電力線通信と TWACS

電力線通信 (PLC) は従来から電圧の周波数領域に信号を重畳し、電力系統をバス型のネットワークとして見立てた通信を提供してきた。本項ではそのような電圧を用いた電力線通信を EVPLC(Electric Voltage based PLC) とする。EVPLC は世界で広く活用されており、X10, HD-PLC[24], G3-PLC[30] といったさまざまな仕様・製品がある。同時に EVPLC に関する研究もまた幅広く行われている [53]。EVPLC では簡単に通信範囲を広げることができる。電力系統は並列接続になっており、建物内のコンセントも同様に並列接続であるため、あるコンセントに接続された EVPLC 信号源の信号は他のコンセントでも受信できる。こういった利点があるため、EVPLC が古くから研究されてきた。

TWACS[19][20] とは、PLC 技術の 1 つであるが、その中でもとくに Ultra Narrow Band PLC(UNB-PLC) などと呼ばれる技術である。EVPLC と異なって、TWACS は電流に信号を重畳して電力線の上で通信を行う。TWACS では主に電流を用いる通信の特性の 1 つである長距離通信が可能なる点に着目して、子機から親機の上り方向の通信に電流を用いている。TWACS は、AMI(Automatic Metering Infrastructure) 実現のために設計されており、変電所に設置される親機と、契約者の家にあるスマートメータの内部に設置される子機の間で通信を行う。この子機と親機が数十キロメートル離れていても通信ができるように設計されている。

TWACS の下り方向の通信、親機から子機への通信で彼等は電圧を用いた通信方式を採用している。親機ではコイル L を回路に対して直列に挿入することで電圧のゼロ交差点を、時間方向で前後に変化させる。子機は、毎回のゼロ交差点の出現が通常よりも、早くなる/遅くなるという部分で親機からの信号を検出する。このゼロ交差点の移動は kHz オーダよりも低く、ほぼ電力供給の周波数と同じような帯域である。そのため高圧・低圧を変換する柱状トランスを越えて信号が伝搬するという特性があり、この特性を用いることで長距離の通信を実現している。しかしながら、

L を直列に回路に挿入することから、この L は数百アンペア程度の非常におおきな電流を流す必要がありとても機器が大型となってしまう。実際に TWACS の親機は物置コンテナ程度の大きさとなっている。

本章では、前章で説明した Z3C を拡張して、電流型の双方向通信を実現する。本章の提案と TWACS の技術的な違いは TWACS では直列接続のコイル L を用いて電源電圧のゼロ交差を前後に移動させるのに対して、抵抗 R を並列に接続することで、子機が上り通信のために発する電流を発生しにくくさせる点にある。これによって、直列に L を接続するのに比べ、親機の大きさを小さくすることが可能となる。

4.3 電流ブロックによる下り方向通信

本節では電流ブロックと呼ぶ Z3C において下り方向の通信を実現する提案技術を議論する。電流ブロックは、前章で述べた Z3C、上り方向の通信原理に強く依存しているため提案内容について述べる前に前章で扱ったなかでもとくに重要な内容をまず議論する。その後、電流ブロックのコアとなるアイデアと、そのモデル化について議論を行い、最後に通信回路の設計についての議論を行う。

4.3.1 Z3C の上り方向通信

本論文では、本章までに、前章で片方向の通信、電力系統の下位から上位への上り方向の通信を提案してきた。ここでは上り方向の通信について、下り方向の通信を説明するにあたって必要な部分のみ議論する。

図 4.3(a) は従来の電圧型の電力線通信と、電流型の電力線通信、Z3C の信号の伝搬範囲の違いについて示している。子機 (CD: Child Device) は電力系統の末端に位置し、親機 (PD: Parent Device) は電力系統の根本に位置する。これは子機を接続機器、親機をスマートメータを模した環境である。子機は信号を電流で親機に送信すると、その信号は従来の電圧型と異なり、他の並列回路には伝搬しない。これは電流の物理法則に従うものである。

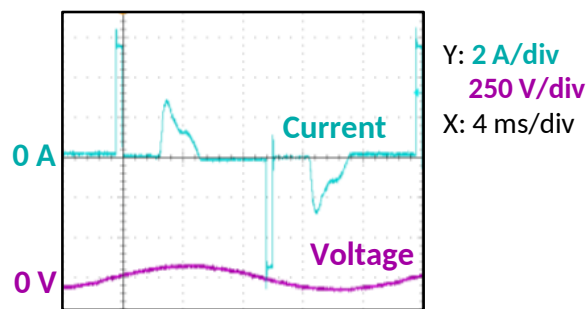
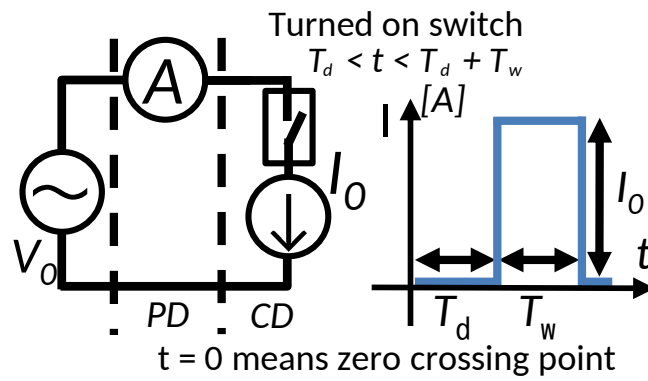
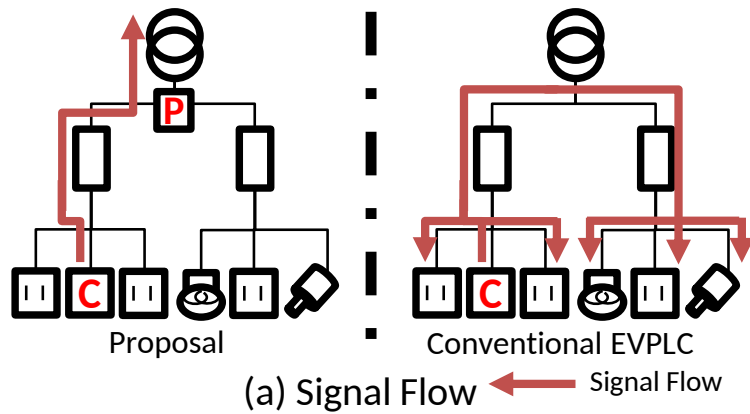


図 4.3: 上り方向通信の重要な点まとめ: (a) 従来の PLC と Z3C の信号伝搬範囲の違い (b) 簡易的な通信の電気回路モデルと電流パルスに関するパラメータ (c) 電流パルスと実負荷による電流

この信号伝搬の特徴が接続機器の自動識別をスマートメータで行うために重要な特性となる。電力系統上の分岐点に受信機を設置していくことで、信号の発信源が電力系統上のどこにあるかを識別することができる。この例であれば、例えば家が隣接している場面であっても、確実にどの親

機の下位に信号源があるかを識別することができる。この電流信号に接続機器の識別子を重畳することで、このスマートメータに、自信の下位にどのような機器があるかを伝えることができる。これが Z3C を用いた接続機器の自動識別の原理である。

電流信号を作り出すための手段として、図 4.3(b) にあるような電圧のゼロ交差点で、回路を短時間短絡する方法をとった。回路を短絡することで、短時間大きな電流を作り出し、この電流パルスを実機で検出する。ゼロ交差点では電圧が低いので電流を大きくしても消費電力は小さく抑えることができる。例えば、仮に電力線の抵抗を $1\ \Omega$ とし、電圧が $10\ \text{V}$ の際に線路を短絡すると電流は $10\ \text{A}$ 流れる。これは力率 100% の装置であれば正弦波のピークでは $141\ \text{A}$ の電流が流れることを示しており、非常に大きな電流である。しかしながら電流を流す期間を $100\ \mu\text{s}$ とすると消費電力はパルス 1 つにつき約 $10\ \text{mWs}$ (milliwatt seconds) と非常に小さなものとなる。このパルスは前述のように非常におおきいため、図 4.3(c) に示すように非常に簡単に検出することができる。この図では、Z3C の通信機が作り出した $5\ \text{A}$ の電流パルスを $50\ \text{W}$ のラップトップ PC が流している電流と重ねて表示している。AC-DC コンバータを用いた直流電源を使うような接続機器は、その内部回路の都合によりゼロ交差点付近では電力消費を行わない。誘導性や容量性の素子である電動機 (モーター) や力率改善コンデンサでは、このゼロ交差点付近で電流を流すがそれらが発生する電流は正弦波であるため、矩形の電流パルスを容易に検出することができる。このようにゼロ交差点に矩形の電流パルスを作ることで、他の負荷装置が発生する電流に埋もれることをさげ強力な信号の重畳が可能となる。

4.3.2 電流ブロックによる下り方向通信

電流ブロックによる Z3C での下り方向の実現が、本章の主たる提案内容である。その基本的なアイデアは図 4.3(c) で子機 (CD) が電流信号を作り出そうとしたときに、親機 (PD) で、この子機による電流信号発生を抑制し、子機はこの抑制を検出することで、親から子への下り方向通信を実現する。この抑制を実現する方法が電流ブロックである。

ここで、以後の議論のために数式形式で電流ブロックを表現していく。まず図 4.4 に電流ブロックの概要を示す。このように電流パルスを B_h の分ブロックする。このブロック量を示す B_h をブロック高と呼ぶ。

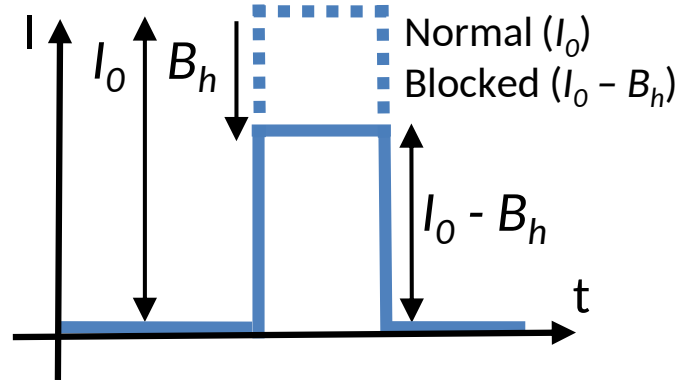


図 4.4: Current Blocking の概要図

まず、子機から親機への通信について定式化を式 4.1 のように行う。子機は電圧のゼロ交差点から T_d の期間待ち、その後 T_w の長さで、パルス高 I_0 の電流を発生する。ここではパルスの有無による 2 値の表現を行う。つまりパルスがあれば真であり、パルスが無い場合は偽である。 V は交流の電圧を示しており、 I は信号電流を示している。

$$V = V_0 \sin(\omega t)$$

$$I = \begin{cases} 0 \\ I_0 \quad (T_d < t < T_d + T_w) \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\text{Where : } t = [0, \frac{\pi}{\omega}]$$

次に親機が子機へ信号を送信するときの表現を持つように式を拡張する。親機は電流ブロックを引き起すことで、子機からのパルス高を $I_0 - B_h$ まで引き下げる。ここで真理値の s ($s \in \{true, false\}$) を電流ブロックの状態を示す変数として用いる。 $s = true$ は電流ブロックを行っている状態、 $s = false$ は電流ブロックを行っていない状態とする。そうして前述の式を拡張すると式 4.2 のようになる。これを実現することで電流型の双方向電力線通信を実現する。

$$V = V_0 \sin(\omega t)$$

$$I = \begin{cases} 0 \\ I_0 \quad (T_d < t < T_d + T_w, s = false) \\ I_0 - B_h \quad (T_d < t < T_d + T_w, s = true) \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\text{Where : } t = [0, \frac{\pi}{\omega}]$$

電流パルス I は電流の流路であるループ全体で等しい。つまり子機で発生した電流パルスや親機で発生した電流パルスは親機・子機とも同じ値を必ず観測できる。しかしながら親機は複数の並列回路をもっており、 I は並列回路から流れる他の電流と重ねあわせられていく。これによって認識は難しくなっていくが、前章で述べたように、 T_w と I_0 を適切に設定し、設置環境で十分検出できるような状態にする。

4.3.3 電流ブロックの原理

前項から述べてきているように、親機 (PD) は子機 (CD) の上り方向通信の電流パルスをブロックして通信を試みる。この原理を説明するために、まず下り方向通信を実現するための回路図を図 4.5 に示す。

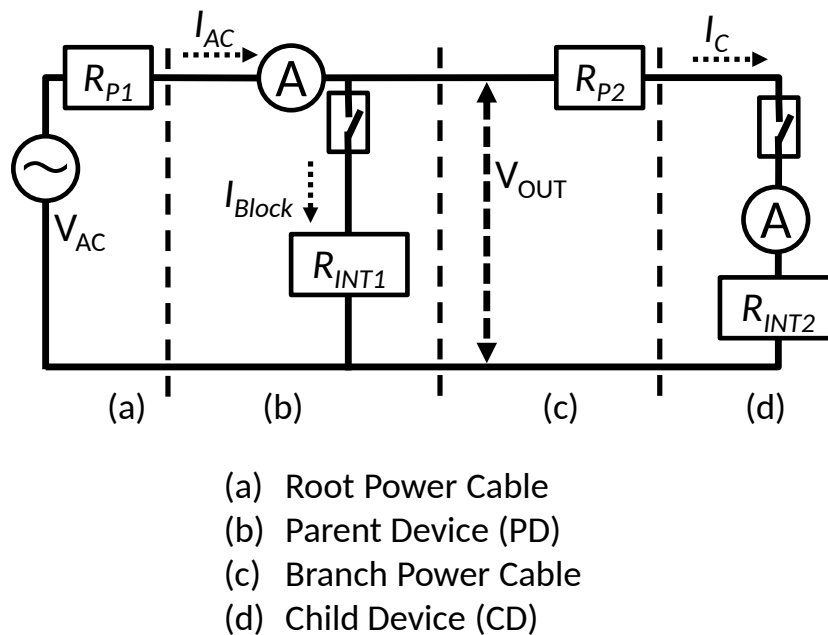


図 4.5: 下り方向通信を行う時の電気回路モデル

親機は V_{OUT} を子機からの電流をブロックするために減少させる。式 4.3 に、 V_{OUT} と I_{AC} の関係について示す。 I_C と I_{BLOCK} は各々子機が発生する電流信号と、電流ブロックのための電流を示しており、親機を通る電流 I_{AC} はこれらの加算で表わすことができる。 I_{BLOCK} を発生させるために親機内部のスイッチを繋ぐ、その結果 I_{AC} が増え、 R_{P1} の影響で V_{OUT} が減少する。

$$\begin{aligned}
V_{AC}(t) &= \sqrt{2}V_{sys} \sin(2\pi f_{sys}t) \\
I_{AC} &= I_C + I_{BLOCK} \\
V_{OUT}(t) &= V_{AC}(t) - I_{AC}R_{P1}
\end{aligned} \tag{4.3}$$

以下の式 4.4 は、 I_C の電流がどのように下るのかをより詳しく示している。 R_O^s は図 4.5 の (b), (c), (d) 全体の抵抗を示している。親機が電流ブロックを発生させたときの全体抵抗を R_O^{true} 、同様に電流ブロックを行わないときの抵抗を R_O^{false} とする。例えば $R_{INT1} = 0$ で電流ブロックを発生させると $I_C^{true} = 0$ となり、完全に電流をブロックする。 R_{P1} と R_{P2} は環境により与えられる、電力線そのものの抵抗値である。それゆえに、設計においては R_{INT1} と R_{INT2} の値を調整して十分な量の電流ブロックが発生するようにする必要がある。

$$\begin{aligned}
R_O^{true} &= \frac{R_{INT1}R_{P2} + R_{INT1}R_{INT2}}{R_{INT1} + R_{INT2} + R_{P2}} \\
R_O^{false} &= R_{P2} + R_{INT2} \\
I_C^s(t) &= R_O^s \frac{V_{AC}(t)}{(R_{INT2} + R_{P2})(R_{P1} + R_O^s)}
\end{aligned} \tag{4.4}$$

式 4.5 は時間に関するブロック高の関数 $B_h(t)$ を示している。

$$B_h(t) = I_C^{false}(t) - I_C^{true}(t) \tag{4.5}$$

ここで、例題として R_{INT1} と R_{INT2} 計算の一例をあげる。この通信を行う環境を住宅だと仮定し電力系統は東日本とする (50 Hz · 100 V)。親機を基幹のスマートメータに取り付け、子機をコンセント接続機器の内部に持ち、家内電力系統の末端に接続する。この例題では、 R_{P1} は柱状トランスからスマートメータまでの電力線の抵抗値であり、 R_{P2} もまた屋内電力線、スマートメータから該当のコンセントまで抵抗値である。IEC 60227-3[54]によると、22 sq のケーブルは 1 キロメートルあたり 0.824Ω であり、5.5 sq のケーブルは同様に 3.330Ω である。そこでここでは、 R_{P1} を 0.25Ω (22 sq のケーブルで 300 m) と、 R_{P2} を 0.33Ω (5.5 sq のケーブルで 100 m) と仮定する。すると、電源からコンセントまでの全配線抵抗は 0.58Ω となる。この配線抵抗に対応する通信機の内部抵抗として、親機と子機の内部抵抗を 1Ω とした。

式 4.6 はこの値設定時の電流ブロックのブロック高の時間に関する関数である。この式によえるとブロック高 B_h はゼロ交差点から 100 マイクロ秒後に約 0.5 A にたつする ($B_h(100 \text{ usec}) =$

0.489). そのとき $100\text{ V} \cdot 50\text{ Hz}$ の交流電圧 V_{AC} は約 4.5 V に足りする. そのときの子機側での短絡電流 I_C は約 2.81 A である. 電流ブロックを親機で発生させると, 子機が発生する短絡電流 I_C は 2.33 A まで減少する. 子機はこの短絡電流の減少を検出し, 親機からのメッセージとする.

$$\begin{aligned} B_h(t) &= \frac{V_{AC}(t)}{1.58} - \frac{V_{AC}(t)}{1.91} \\ &= 0.11V_{AC}(t) \end{aligned} \quad (4.6)$$

4.3.4 他の接続機器への影響の考慮

提案である電流ブロックは, 出力電圧を短時間下げるため, 並列回路に繋がった他の機器への副作用がある可能性が考えられる. しかし実際の環境では問題にはならないと考えられる. 本項ではその点について述べる.

図 4.6 は交流の低圧電力系統に接続される装置の種類を示している. 電気回路の理論上はさまざまな装置が想定できるが, 実際の運用上, 建物の $50\text{ Hz}/60\text{ Hz}$ の電力系統に接続される装置はこの 4 種類のどれかに分類できる. その 4 種類とは, 抵抗性素子, 誘導型結合, 力率改善コンデンサ, ダイオードインプットである. 抵抗性素子とは電熱器や白熱電球のような純粋な抵抗素子である. 誘導性結合とは交流トランスや電動機のような電磁誘導を用いて電力を供給する装置である. 力率改善コンデンサとは容量性の素子であり, 無効電力を下位の系統に供給する目的で設置される. これら 3 つの方式の他に, ほとんどの接続機器がとっている方式としてダイオードインプットがある. ダイオードインプットは AC-DC コンバータの一段目に設置される. ほぼすべてのコンセントに接続される装置は直流電源を必要とするため, これらの装置はダイオードインプットである.

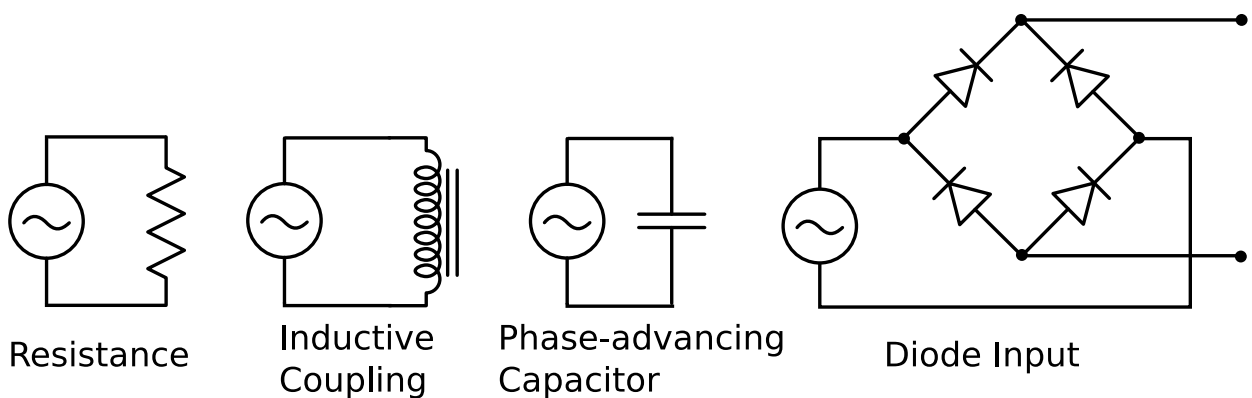


図 4.6: 低圧電源系統に接続される 4 種類の入力回路

電流ブロックは電圧のゼロ交差点付近において、出力電圧を減少させる。それゆえに、その副作用は極めて小さい。例として抵抗素子 R Ω を考える。その抵抗素子が消費する電力はオームの法則によって計算でき、電流ブロックによる影響も同様に計算可能で、 $B_h(t)^2/R$ で求められる。前項の $B_h = 0.5 A$ の場合で、1000 W の電熱器 (10 Ω と考えると、そして 100 マイクロ秒ブロックしたとすると、減少幅は 2.5 mW となり、全体電力の 0.25% となる。これは無視できる大きさである。

4.3.5 親機と子機的设计

電流ブロックによる通信を実現するための実装回路として、図 4.7 のような回路図を提案する。この回路は主に抵抗 R_C と N-ch FET Tr_1 から成り立っている。この Tr_1 と R_C で回路を短絡することで、子機からの電流信号と、親機での電流ブロックを実現する。

マイクロコントロールユニット (MCU) は V_{in} をトランジスタスイッチ Tr_2 により 0 V に落すことができる。これにより、短絡電流 I_F を発生させる。このスイッチング回路を親機・子機両方にしようした。つまり、 I_F とは前項の、 I_{BLOCK} と I_C 両方をさすこととなる。

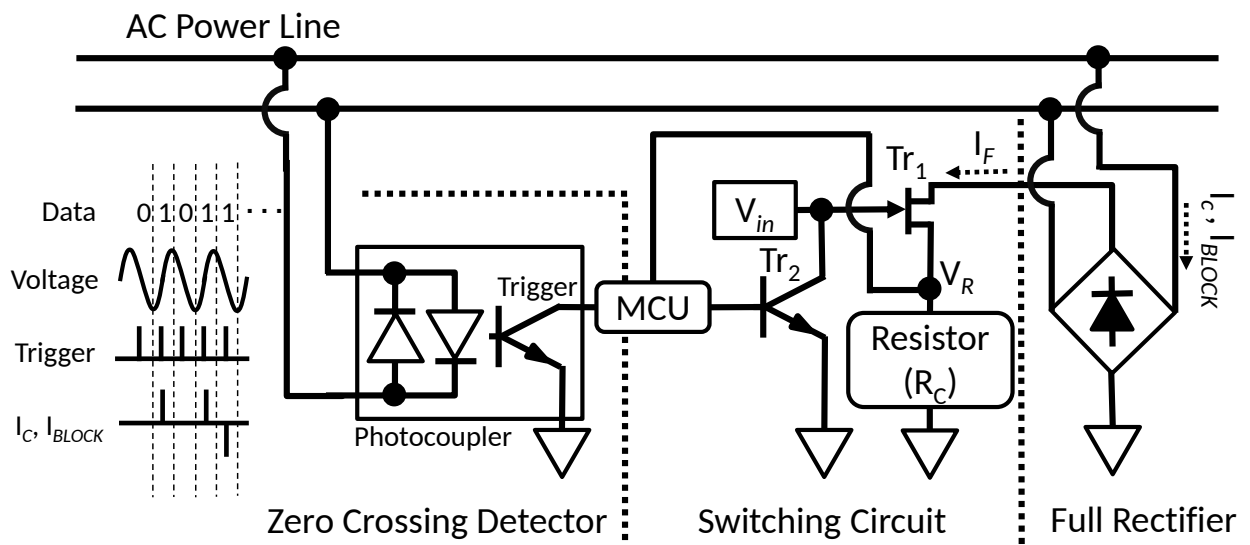


図 4.7: Current Blocking 実現のための回路図

電流ブロックの検出原理は次のようになる。MCU のアナログデジタル変換 (ADC: Analog Digital Converter) ポートを用いて、電流 I_F を計測する。計測のために抵抗 R_C と FET Tr_1 の間の電圧を ADC ポートで計測する。オームの法則により、 $I_F = V_R/R_C$ で電流を求められる。

子機が T_{r1} を短絡状態にし信号電流 I_F を発生させたとき，ADC ポートで計測した V_R が事前に設定した閾値よりも低い場合，親機による電流ブロックが発生したと子機は認識する。

通信機の制御用インタフェースは USB-TTL シリアルインタフェースとする．子機は制御用のコンピュータから，パルス発生のために必要なパラメータ T_d と T_w を決定するために必要なデータを受け取り，電流パルスを次の電圧ゼロ交差点で発生させる．発生後 I_F の値を計測し，それを制御用のコンピュータに返す．親機でも同様に電流ブロックの長さを制御用のコンピュータとやりとりする．親機ではそれに加えて，配線に流れる電流を別途計測する．実際の運用では，子機と親機は別々の制御用コンピュータに繋がる．これらの媒体アクセス制御 (MAC: Media Access Control) にかかわる詳細は次節で詳しく述べる。

4.4 ZMAC: Z3C の媒体アクセス制御

本節では，Z3C を双方向通信に拡張するための媒体アクセス制御方法である ZMAC について述べる．図 4.8 は ZMAC を設計するにあたって，仮定しているトポロジである．親機が低圧電力系統の根本にとりつき，子機が並列回路にとりついている．親機は1つで，子機は複数設置する．子機と親機の通信はマスタ/スレーブ型で行う。

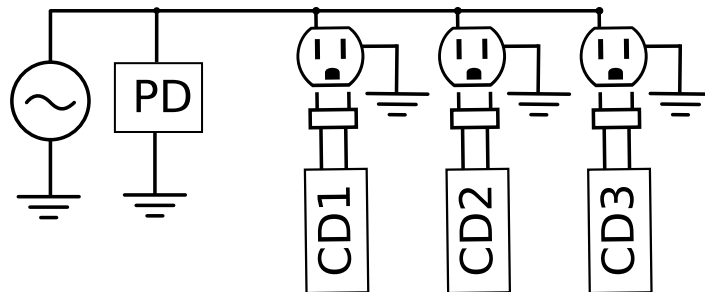


図 4.8: ZMAC の想定トポロジ

4.4.1 通信の手続き

Z3C では，親機から子機への下り方向の通信は，子機からの電流信号への電流ブロックによっておこなわれる．そのため通常のマスタ/スレーブ型の通信のように，親機から子機へまず要求を出し，その結果を子機から親機へ応答するという形を取ることができない。

そこで ZMAC では次に示すような通信の流れを行うことで、Z3C の持つ特殊な物理層であっても、マスタ/スレーブ型の通信を実現した。

1. 初期状態の子機は、自由にメッセージを適当なタイミングで送出する。このときこの子機は他の子機と同期していない状態である。
2. 親機は、前述の子機が送出したメッセージを受信し、メッセージ内のチェックサムを計算し正しく受信できた場合には、子機のメッセージの最後の信号に対して電流ブロックを行う。このことで親機は子機にメッセージが正しく受信されたことを示すことになる。
3. 子機は、親機からの電流ブロックを受け取ったあと、親機からのメッセージを受信するための電流パルスを発生する。
4. 親機は、子機に送信したいメッセージにあわせて電流をブロックする。このメッセージの中に、子機の次のメッセージ送出タイミングを含める。ここで、他の子機と通信が衝突しないように調整する。
5. 子機は親機からのメッセージを受信し、メッセージ内に含まれる次のメッセージ送出タイミングをメモリ内に保持する。これによって、この子機は親機と同期される。

この通信の流れのなかで、衝突が発生しチェックサムエラーがおきた場合には、親機は電流ブロックを行わない。子機は自信の信号を送出したにもかかわらず、親機によるブロックが発生しなかった場合には衝突がおきたと認識し、乱数時間待って再度送出を試みる。

このような流れで通信を行うことで、初期状態では一切同期されていない子機群が、一度親機との通信を行うことで同期され安定してマスタ/スレーブ通信を行うことができるようになる。

4.4.2 ZMAC のフレーム設計

親機と子機でやりとりされるメッセージは ZMAC フレームと呼ぶ本項で提案するフレーム設計になっている。ZMAC フレームは固定長で、図 4.9 に示すように主に 2 つのパートから成り立っている。初めのパートが上り方向通信で用いられ、後半のパートが下り方向通信で用いられる。

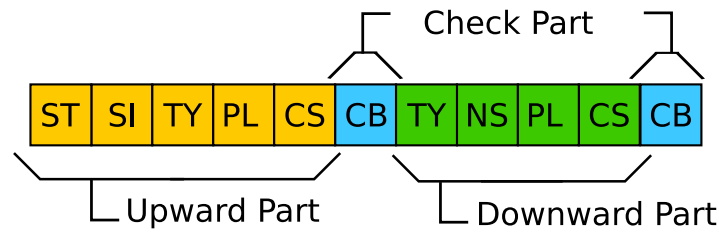


図 4.9: ZMAC フレームの概要

はじめの上り方向通信用のパートは5つのセグメントから成り立っている。それは開始セグメント (ST), 送信元識別子 (SI), メッセージの種類 (TY), チェックサム (CS), そしてペイロード (PL) である。後半の下り方向通信用のパートは4つのセグメントから成り立っており、それらはメッセージの種類 (TY), 次のタイムスロットへの指示 (NS), チェックサム (CS), そしてペイロード (PL) である。CB セグメントはこれらのメインパートの後におかれ、通信の成功確認のための電流ブロックが行われる場所である。

フレームは全体で9バイトで、全42回のゼロ交差点で送信することができる。各セグメントの大きさは、上り方向通信用の ST, SI, TY, PL, CS は各3, 8, 5, 24, 8ビットであり、下り方向通信用の TY, NS, PL, CS は2, 6, 8, 8ビットとした。2つの電流ブロック用セグメント CB は1ビットである。

4.5 実験と考察

提案の電流ブロックを用いた下り方向通信と、ZMACによる双方向通信の性能評価のための実験について本節で述べる。まず実験結果について述べ、その後他の機器への副作用に関する考察を行う。

4.5.1 電流ブロックの実証

電流ブロックの実証に関する実験設定について、図4.10に示す。親機は実験を行った建物（東京大学工学部2号館10F）の壁コンセントに繋がっている。そして子機は延長ケーブル経由で親機に接続されている。この延長ケーブルが前述の R_{P2} である。電源の延長ケーブルの他の平行回路のコンセントに4種類の装置を接続した。それらは、交流電動機、掃除機、AC-DCコンバータ、白熱電球である。制御用のラップトップPCに親機と子機の両方をUSB経由で接続した。USB-TTLシリアルインタフェースは、ボーレート115200 kbpsで通信する。

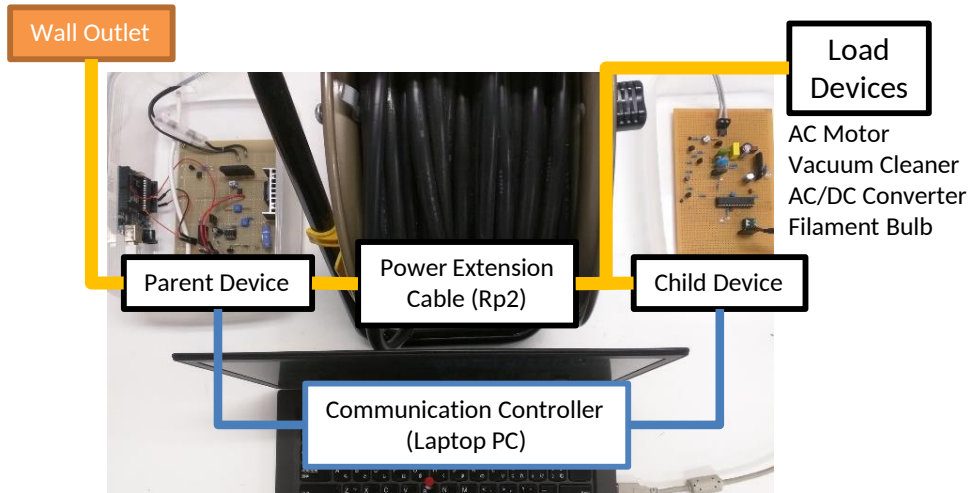


図 4.10: 実験設定

通信装置は親機・子機ともに同じ回路・部品を用いて実装した。使用した部品について表 4.1 に示す。電流ブロックを認識するためのブロック高の閾値は I_F の 70% とした。子機から親機への上り方向の通信のためのパラメータ, T_w と T_d は 200 マイクロ秒と 40 マイクロ秒とした。建物内の電力線の線抵抗である R_{P1} は環境によって与えられるものであるが、今回の建物では 0.7Ω である。延長ケーブルの抵抗値 R_{P2} は 0.64Ω であり、その長さは 60 m である。この実験では子機は全ゼロ交差点で電流パルスを作り出し、親機ではそれをブロックしようと試みる。

表 4.1: 実験機材を構成する部品リスト

| | |
|---------------------------|-----------------------------------|
| MCU | ATMEL ATmega328P, 16MHz, 2KB SRAM |
| ADC | MCU internal, 60 kHz |
| FET | Renesas Electronics, TK8A25DA |
| R_{INT1} and R_{INT2} | 1Ω |

この実験では、2つの事象を確認する必要がある。ひとつは電流ブロックが設計通りに発生すること、もひとつは電流ブロックが発生するブロック高が検出するのに十分であることである。図 4.11 にその結果を示す。左のグラフは電流ブロックを行わないときの電流パルスを示している。右のグラフは電流ブロックを行ったときの電流パルスである。緑の時系列の値は親機による電流ブロック I_{BLOCK} を示しており、紫の値は出力電圧 V_{OUT} 、水色の値は子機から親機に向って生成される電流パルス I_C を示す。この図に示すように I_{BLOCK} が V_{OUT} を減少させ、その結果

I_C が電流ブロックを行っていないときと比べて低くなっている。この例ではブロック高 B_h は約 0.5 A となっており、この値は前述の式 4.5 に従う。

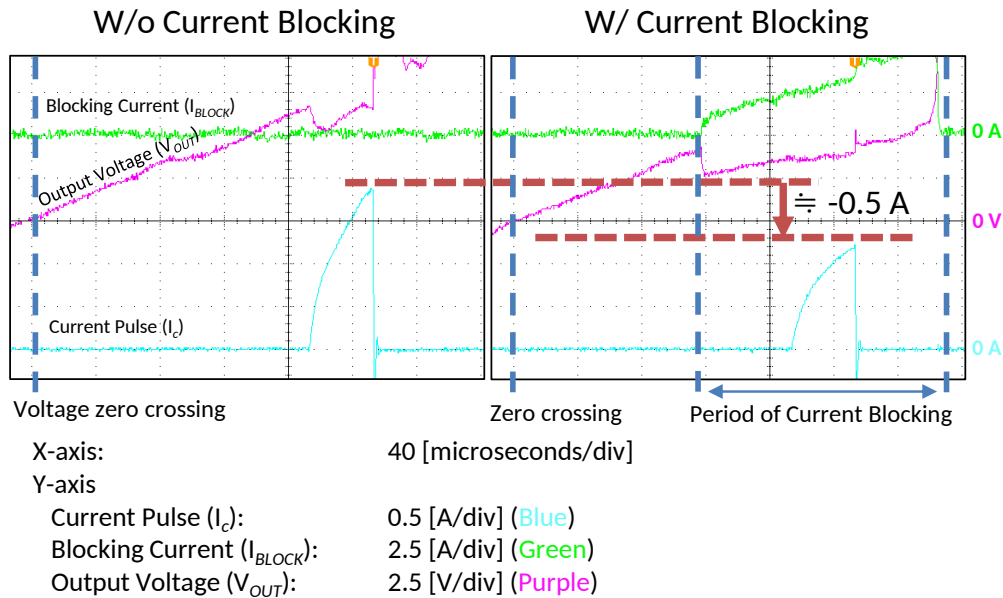


図 4.11: 通常の状態での電流パルス (左) とブロックされた電流パルス (右)

この電流ブロック高は子機での検出可能な十分である。今回の実験設定は式 4.6 の項で行った例に沿って設定した。この結果により、電流ブロックを用いた下り方向の通信が実現できることが確認できた。

4.5.2 他の接続装置への副作用

電流ブロックは電源の出力電圧 V_{OUT} を減少させる。これは他の並列回路に接続された装置への副作用が発生する可能性がある。この実験では 4 種類の負荷装置を接続して、それらの装置への影響を調べた。前述の実験と同じようにして電流ブロックを親機で発生させて実験した。

実験中照明や交流電動機の変動や、機器内部からの異音など、とくに不自然な動作などは確認できなかった。電流ブロックによる電源系統の電圧降下により、接続機器では僅かに供給電力が減少する。図 4.12 はこの副作用を示している。青色の時系列データは機器へ流れる電流であり、緑色のデータは電源の電圧である。電圧は機器のプラグで計測している。

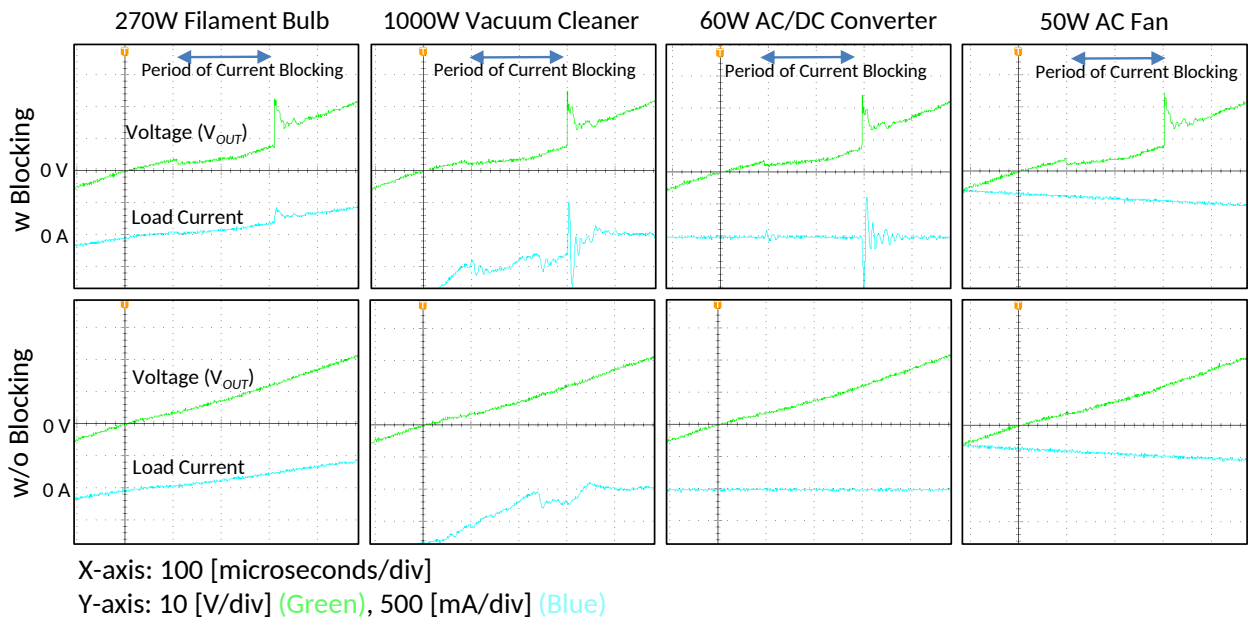


図 4.12: 上位で電流ブロックを行った際の 4 種類の負荷における出力電圧 V_{OUT} と消費電流の変化

電圧に歪みが生じているが、これは図 4.7 の FET, Tr_1 のスイッチングによるものであるが、スナバ回路などを調整することで歪みを避けることはできる。ひずみ以外の部分で、電圧が変動することにより電流に変化があることが確認できる。しかしながら電源は無効電力の供給源ではないため、交流の電動機には影響がでていないことも確認できる。影響を受けている 270 W 白熱電球においては、この電流ブロックにおける電力供給の減少は全体の 0.01 % 以下である。このことから、電流ブロックによる副作用は無視できると考えられる。

4.5.3 多ノードによるマスタ/スレーブ通信

図 4.13 に示すような親機 1 つ、子機 3 つを用いて通信実験を行った。親機に Raspberry Pi3, 子機 3 つはラップトップコンピュータに接続して通信が可能であることを確認した。システムを起動すると、起動時には同期されていない子機同士の電流信号の衝突が観測され、数秒程度経過した後親機から割り当てられたタイムスロットで安定的に動作した。このように設計通りに通信が可能であった。

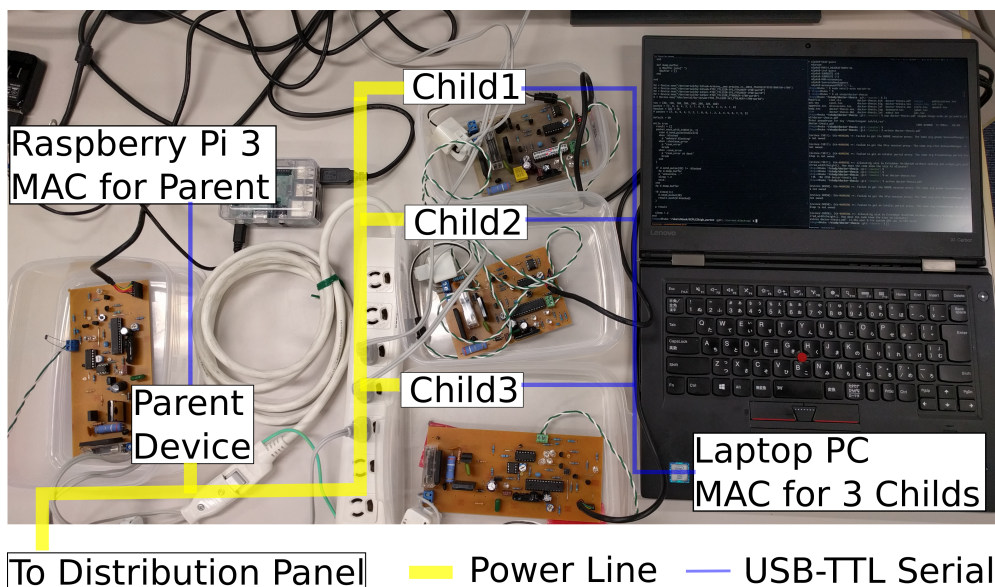


図 4.13: 多ノードでの通信実験環境

本システムのスケーラビリティを評価するために、初期状態から同期状態への移行がどのように進むかシミュレーションを行った。ここでは ZMAC の設計を用いた通信シミュレータを開発した。この通信シミュレータを用い、定められた制限時間内に通信機全体が同期状態になれる通信機の台数を評価した。

開発した通信シミュレータのパラメータには、信号送出間隔、リトライまでの最大待ち時間、通信機台数がある。信号送出間隔とは、親機が管理する子機が信号を送出する周期であり、前述のフレーム設計におけるタイムスロット TS である。ここを 120 秒とすると、120 秒おきに全子機からの信号を受信することを親機は期待する。リトライまでの最大待ち時間とは、子機が信号を送出した後に親機から電流ブロックされず、通信が失敗した場合にリトライを行うが、このときの最大待ち時間である。

図 4.14 に通信シミュレーションの結果を示す。ここではリトライまでの最大待ち時間を 20 秒とし、信号送出間隔を 120 秒と 600 秒の 2 つについて、通信機を増やしながらシミュレーションした。各台数において 100 回シミュレーションを行い、その平均値をプロットしている。この送出間隔は本論文が対象とする低圧環境での接続機器識別というタスクに対して適当であることから 120 秒と 600 秒とした。台数が増えるに従って通信の衝突が発生し、通信機によるリトライ回数が増えていくことがわかる。なお、通信成功確率はこれらのリトライをくりかえした結果、通信機の同期が送出間隔を越えた場合に失敗とし、算出している。このように通信機が 120 秒のとき

は 80 台, 600 秒では 500 台を越えたあたりから, 通信成功確率が下ることがわかる. この 80 台から 500 台の実験結果により, 低圧の機器の個数を考えると本通信システムのスケーラビリティは十分であると言える.

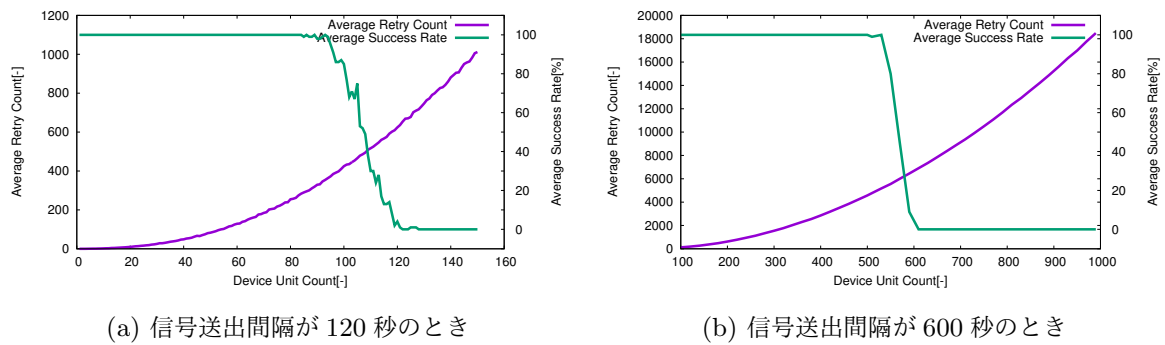


図 4.14: 通信シミュレータによる台数に対する通信成功確率とリトライ回数の変化

図 4.15 に, 信号送出間隔を 120 秒とし, リトライまでの最大待ち時間を変えながら前述と同様のリトライ回数と通信の成功確率を示す. 図 4.14 の結果から, 110 台前後が確率 50 % であるため, 110 台の前後の台数でシミュレーションを行った. 110 台であっても 8 から 10 秒程度の待ち時間を用いることで 80 % を越える成功率となり, リトライまでの最大待ち時間は台数ごとに最適値が異なることがわかる.

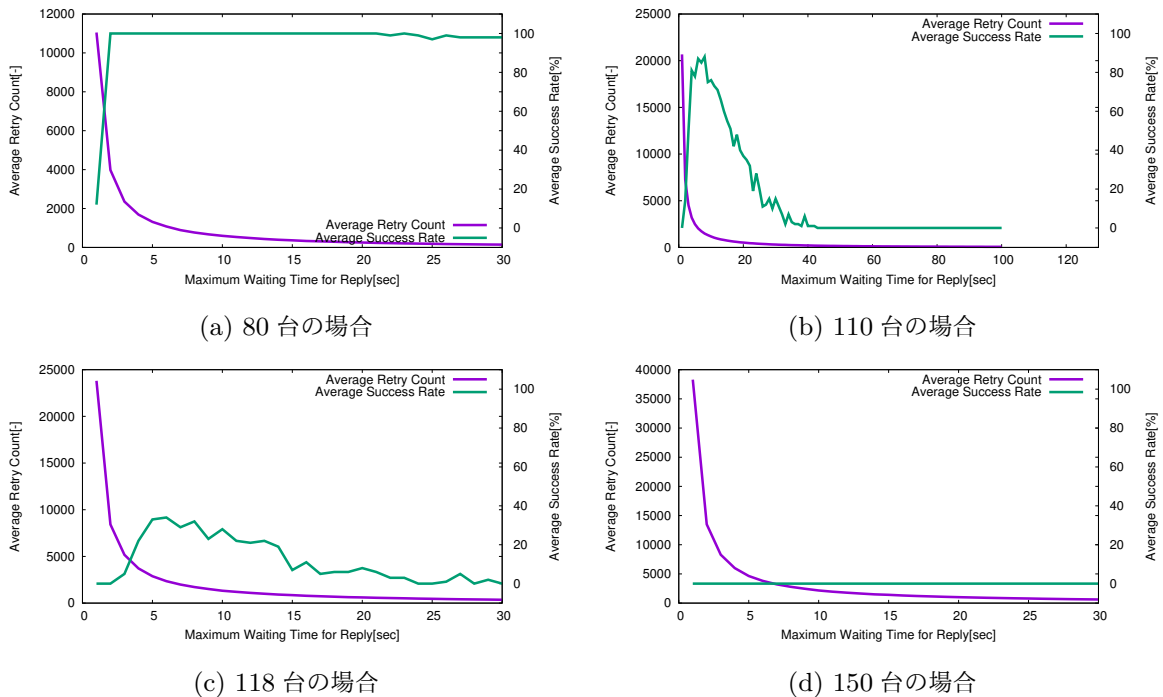


図 4.15: 通信機の台数別での最大リトライ時間別の通信成功確率とリトライ数

これらの実験は、ZMAC の実装プログラムを用いたシミュレーションである。図 4.15 の結果から、通信システムの最適駆動点を見つけるためには設計の数学的モデル化を行い解析的なアプローチが今後必要であることがわかる。しかしながら、本章の目的である、電流ブロックを用いた Z3C の双方向への拡張という観点での評価は本シミュレーションによって行うことができた。

4.5.4 従来手法による実現との比較

本章で提案した電流ブロックによる新しい下り方向通信では、上り方向での関連研究であった TWACS と異なり、下り方向通信用のハードウェアを子機側で必要としないという特徴がある。また、直列ではなく並列回路による設計を用いることで、TWACS の親機と比較しても物理的に小さな実装をすることが可能となった。このように通信機の実装における大きさと、実装にかかわる部品点数が少ないという利点が存在する。

電流ブロックが発生する電圧降下は、並列回路に繋がっているすべての通信機に伝わる。そのため、この方式は結果として従来の電圧型 PLC に近い特性を持ち、すべての分岐回路で原理上、親機の通信が観測できる。しかし、この電圧変化を電流変化で読み取る方法を取ることで、上

り方向通信と全く同じ通信距離を持つ下り方向通信とすることができる点に利点がある。一方で、Z3Cの上り方向通信に、従来のPLC技術を下り方向通信として用いるような組合せに関する実験や研究を行っていくことも今後必要になる。

4.6 まとめ

本章では電流ブロックによるZ3Cでの下り方向、電力系統の根本からコンセント方向への電力線通信を実現する方式を議論した。電流ブロックをモデル化し、通信機の回路を設計した。それらの設計を用いたプロトタイプを実装し、プロトタイプにより動作と実現可能性を検証した。この通信による副作用などについても議論を行い、副作用が全体のおおきさに比べてとても小さく、無視できる程度であることを確認した。また実験により、電流ブロックによる概念が問題なく動作することを確認することができた。

本章の実験では、 R_{P1} に実験を行った建物の既設配線、 R_{P2} に延長ケーブルを用いた、しかしながらこの値はアプリケーションによって変化する。例えば電流ブロックを柱状トランスとスマートメータの間で行う場合などではこれらの抵抗値はより低いものになり、その場合 R_{INT1} と R_{INT2} はそれらにあわせて再計算する必要がある。

そのため、今後の課題としてはこれらの値をどのように設定するかより深くシステムの体系化を進めていく必要がある。電流を用いた電力線通信の主たる利点は通信距離と信号伝搬範囲である。そのため自動検針システム (AMR: Automatic Meter Reading) や BA システム (Building Automation System) などでの利用の可能性が考えられる。

第 5 章

応用例: 回路遮断機による需要制御

本章では、本論文で提案した電流型電力線通信による接続機器識別が可能になることを前提として、新しい需要制御システムを提案する。従来のすべてのコンセントに通信機能付きのスイッチを取り付けるよりも 1/300 程度の装置数で同じシステムが実現できる。

5.1 背景

新興国においては、ほぼすべての商用ビルや居住用ビルに自家発電装置が配置されている。電力会社が運用する電力系統が不安定で頻繁に停電をおこすためである。それらの自家発電装置は化石燃料を用いるため、二酸化炭素排出量を増やしてしまい、またメンテナンスと運用にもコストがかかってしまう。太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーを新たな発電源とすることも広く考えられているが、近年の調査研究 [55] によると再生可能エネルギーによる発電は、初期投資の金額がとても大きいことから、まだ普及する段階にはない。つまり、従来通りの化石燃料を用いた自家発電装置はすくなくとも次の 4 年、5 年の期間ではまだ主流な方式であろうと想定しなければならない。

本章の目的は、自家発電装置が生む電力を最大限活用するための最適な運用システムを提案することである。上述の通り自家発電装置は今後も主流であると考えられることから、その運転を最適化することは二酸化炭素排出量の削減、さらに運用コストの削減にもつながる。従来までの自家発電装置の出力能力を決める際には、その装置がカバーする電力系統の末端に配置された回路遮断機の遮断閾値をすべて単純に足しあわせた値を用いてきた。例えば、220 V のシステムで、各回路遮断機の遮断電流が 10 A かつ 100 台が配置されていた場合は 1000 A/220kVA の出力能力を持った自家発電装置を選択する。一般的に負荷装置の消費電力は回路遮断機の閾値よりもピーク時間

以外ではかなり低いことが多いが、もしも自家発電装置の出力能力がピーク時間帯の需要よりも低い場合には自家発電装置の動作が不安定になってしまい自家発電装置の停止、停電などを引き起してしまう。つまり、ピークの時間帯など、どんな場合であっても自家発電装置の出力能力を超えないように需要を抑制しなければ、自家発電装置の安定稼働は保証することができない。本研究では、自家発電装置の出力能力を超えないように需要を抑制するための新しいシステムを考案する。それによって、ピーク時間帯以外の停電において、従来のような静的な自家発電装置のカバー範囲設定よりもより広い範囲への電力供給を実現し、より多くの機器を稼働可能にする。

本章で提案する新しいシステムで重要な役割を持つ装置がスマート回路遮断機 (SCB: Smart Circuit Breaker) である。SCB は回路遮断機の閾値をネットワークから動的に設定できるものである。この SCB と動的設定のアルゴリズムの組合せにより、電力会社による停電発生時の、自家発電機使用率を向上させる。SCB は従来の回路遮断機を置き換える装置であり、SCB コントローラからの指令で、停電発生時の閾値を設定する。SCB は自立的に停電を検出し、停電時に事前にコントローラから与えられていた閾値に切り替わり、自家発電装置の出力能力以下に需要を抑える。このように駆動することで自家発電装置の動作を最適化できる。

本章の構成は次のとおりである。第2節で需要制御、とくに上限や制約をつける方法についての関連研究を紹介する。第3節では、SCB を用いた自家発電装置向けの最適運用システムに求められる機能要件の整理を行い、システムの設計方法を提案する。第4節でこの SCB システムを制御するためのアルゴリズムについて述べ、第5節でこれらのシステムの実装と、実装を用いた実験ならびにその結果を述べる。

5.2 関連研究

本研究で行うような需要に制限をするような仕組みの研究は、コンピュータサイエンスの領域でとくにデータセンターに関する研究開発で、Power capping と呼ばれ研究開発が進められている [56][57][58]。例えば各サーバ内の CPU の動作クロック速度を減少させたり、ディスクへの書き込みを一時的に保留にする方法、あるいはサーバの電源を補助する無停電電源装置 (UPS: Uninterruptible Power Supply unit) を停電が発生していないのにもかかわらず動作させ、一時的に系統からの電力供給を削るピークシフトなどが行われている。これらの試みをまとめて近年では、DCIM(Data Center Infrastructure Management) などとも呼ぶ。また CPU やメモリなどのチップそのものに、制約を設定するためのインタフェースを用意し、その制約下で動作するような研究も行われている [59][60]。しかしながらこれらのシステムを直接、自家発電装置への需要

制限の仕組みに応用することは難しい。

スマートグリッドの研究領域では数々のエネルギー消費の効率化に関わる研究・試みが行われている。多くの研究者が様々な領域で、最新の技術を駆使した新しい需要制御の仕組みを設計、提案、実験している。その中でもとくに建物に対する研究が多い [61][62][63]。通信機能のついた家電装置や、通信機能のついた電源タップによる需要制御は近年もっとも注目されている手法である [64][65]。建物内のあらゆるコンセントに通信機能と電源スイッチ制御の機能を取り付け、コンピュータから適切に制御することで需要制御を実現している。このような需要側で供給側のために需要制御することを需要応答 (DR: Demand Response) と呼ぶ。この DR を実現するに多くの研究者・技術者が DR を実現するための通信プロトコルや通信術の研究を行っている [66][67][68]。これらの通信技術と通信機能付きの機器を使うことで DR を実現していこうとしている。

スマートグリッドでの DR の研究は主に、ビルの消費電力を抑えることに主眼がおかれている。一方で、本章で提案する需要制御は、自家発電装置の出力能力をなるべく使いきるように制御することを目的としている。このような需要を増やすという点について従来ではあまり活発に研究が行われてこなかったのが実状である。

また通信機器をすべての家電が持つ Smart Device と、通信機器をコンセント等が持つ Smart Power Strip と比較した場合に、通信機器を回路遮断機で持つ SCB では機器の設置個数を大幅に減らすことができるという特徴がある。通常、1つの回路遮断機で 10 程度のコンセントないし負荷装置を担当する。1箇所の分電盤で 30 程度の回路遮断機を収容する。つまり、SCB は一度の設置で、最大 300 個程度の装置分の需要を制御できることになる。

表 5.1 に、Smart Device, Smart Power Strip, そして SCB の 3 つの装置について、それらで需要制御システムを作る場面での比較を示す。典型的な住宅と商業用ビルについての個数と、設置のしやすさ、制御の粒度について並べている。自明なことであるが設置数が減ると設置はしやすい。一方で、遮断機という最大 10 程度の機器が繋がる回路をまとめて制御するため、制御の粒度は粗いものとなる。

表 5.1: 需要制御システムを, SCB, Smart Device, Smart Power Strip の三種の装置で作った場合の違い

| | Smart Device | Smart Power Strip | SCB |
|---------------------------------|----------------------|----------------------|------------------|
| #Devices in Home | Under 200 | Under 200 | Under 5 |
| #Devices in Commercial Building | Around 1000 to 10000 | Around 1000 to 10000 | Around 10 to 100 |
| Fineness | High | Medium | Low |
| Deployability | Low | Medium | High |

5.3 回路遮断機での自動需要制御

本節では, 提案の SCB による需要制御システムについて述べる. 図 5.1 はシステムの概要を示している. 建物に設置されているメイン分電盤が 2 つの電源, 電力系統と自家発電装置に繋がっており, この分電盤のスイッチで適切な電源を選択する. 建物内のサブ電力系統はすべてこのメイン分電盤から分岐するとする. 各サブ電力系統は SCB によって制御・監視される. すべての SCB はコントローラからデータを Zigbee, Wi-Fi, PLC などのネットワーク経由で受信する. コントローラはメイン分電盤の近くに配置され, メイン分電盤がどちらの電源を使っているかを監視する. この監視は自家発電装置と電力系統双方の引き込み線に設置する電流計によって実施する. このメイン分電盤に繋がる電源状況によって, 提案している需要制御システムでは, すべての SCB に対する閾値を決定する. コントローラは各 SCB への閾値設定アルゴリズムを用いて閾値を電源の供給能力を超えないように計算し, コントローラから通知する.

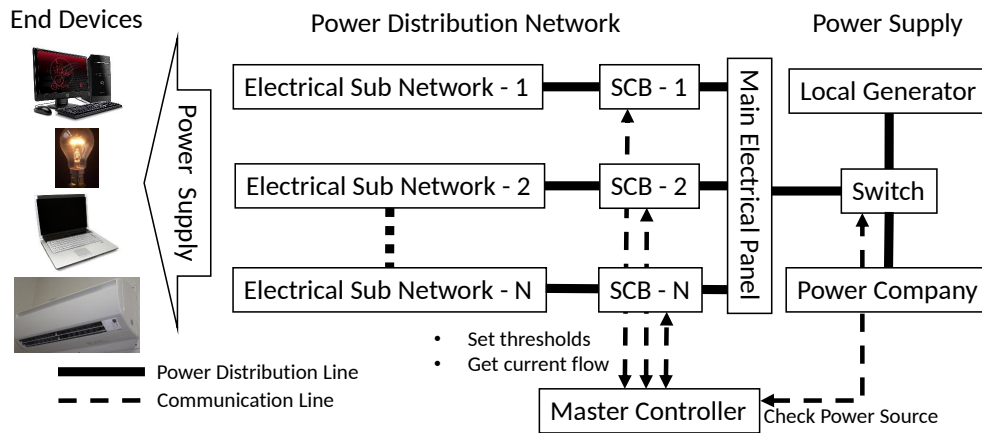


図 5.1: 提案する SCB を用いた需要制御システム

5.3.1 SCB による需要制御システムに求められる要件

本項では、SCB で作る需要制御システムに求められる要件についてまとめる。4 つの各要件に対して、なぜそれが必要かの理由を説明する。

SCB の閾値変更にかかる遅延

電源が切り替わった際などで、SCB の閾値を変更するのに必要な時間は数秒程度にする必要がある。なぜなら近年の自家発電装置は自動起動であるため、人の操作などを一切必要とせず、数秒程度で電力の供給を開始するためである [69]。つまり、需要制御システムはビル内に設置された SCB の閾値を数秒以下、自家発電装置からの給電が始まる前に完了させる必要がある。

人の活動

需要制御システムは何らかの形で居住者の活動について考慮する必要がある。電力の需要は建物内の人の活動におおきく左右される。単に閾値をコントローラが設定した場合、例えば、人が突然大きな消費電力の装置を起動してしまった場合などに SCB が電力を止めてしまい、結果として利用が不可能になってしまう機器の数が増えてしまう。そのようなことを避けるために需要制御システムと居住者の間には何らかのインタラクションが必要である。

SCB の孤立運転モード

すべての建物内に設置された SCB はコントローラとの接続性を失っても正しく動く必要がある。停電が発生したときには、ネットワーク機器などにも不具合が発生して SCB とコントローラが接続できなくなる可能性は少ない。例えば Wi-Fi を用いていた場合にアクセスポイントの電源が切れたり、ZigBee や PLC の中継ノードの電源が落ちたりするなどである。提案する需要制御システムは、このような場合であっても正しく動作し、復電時に需要を自家発電装置の供給能力以下に抑える必要がある。

バックアップ電源

SCB は必ずバックアップの電源を持たなくてはならない。停電時に自家発電装置にあわせて閾値を切り替える動作を行うためには、停電が発生しても動きつづける必要があるためである。しかしながら大型の二次電池を各分電盤に取り付けることは現実的でないため、電力効率の良いプロトコルを定め、小型なバッテリーを用いることが望ましい。

5.3.2 プロトコルとインタフェースの設計

プロトコルを設計するにあたって、消費エネルギーを抑える観点から、本システムでは一般によく使われるコネクション型の通信ではなく、コネクションレス型のマスタ/スレーブ通信とすることとした。マスタがコントローラでスレーブが SCB となる。SCB でのクロック同期やクロック周波数の高い正確性を担保することが難しいことから、マスタ/スレーブ通信の中でもマスタコントローラからの定期的なポーリングを用いる方式を選択した。それにより、マスタ/スレーブ通信であるにもかかわらず、スレーブデバイス (SCB) のネットワークインタフェースを sleep モードに長い時間することができ、マスタからデータを受けつけるときのみネットワークインタフェースを起すという運用が可能となる。結果として、データ送信間隔に対するデータ送信に要する時間をとても小さくすることができ、長い期間ネットワークインタフェースを sleep モードとすることができる。

図 5.2 は SCB のコントローラと SCB の間で用いられる共通パケットフォーマットを示している。パケットの大きさは可変であり、第 2 フィールドにパケットの大きさが示される。最初のフィールドはパケットの開始符号であり、この開始符号でパケット受信のシーケンスを同期し開始する。第 3 フィールドはパケットの種類を示す。最後のフィールドはパケット全体のチェックサ

ムとしており、これは第 1 フィールドの開始符号 (0xFF) を除いたすべてのバイトの排他的論理和である。

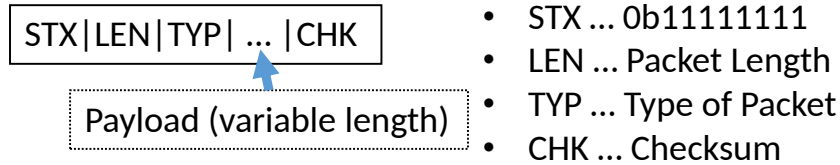


図 5.2: SCB とコントローラ間の共通パケットフォーマット

図 5.3 に示すように、共通パケットフォーマットを用いて 4 種類のパケットメッセージを定義した。それらは、通知クエリ、通知応答、ステータス情報クエリ、ステータス情報応答の 4 種類である。通知かステータス報告のどちらかのクエリをコントローラが送信すると対応する応答が SCB から戻ってくる。この設計の重要な点は通知クエリの中に含まれている情報である。

| | | | |
|-----------------------------|-------|--------------------------------------|--|
| Notification Payloads | Query | P Mode Config 1 ... Config N | Configuration (Config) |
| | Ack. | Empty | TH1 SW1 TH2 SW2 TH3 SW3 |
| Status Information Payloads | Query | Empty | Information (Info) Config layout is same as above |
| | Ack. | SCB Mode P Mode Info 1 ... Info N | Config(6 vals) Ave. Max Dive. |

図 5.3: 四種類のパケットメッセージ

通知クエリメッセージは SCB の遮断閾値とスイッチ状態を設定するために送信するメッセージである。通知クエリメッセージは、2つのフィールド種類、電力系統状態フィールド (図 5.3 中の P Mode) と設定フィールド (同図中の Config) から成り立っている。電力系統状態フィールドはメッセージに対して1つのみ設定する。一方設定フィールドは SCB の回路数分存在する。つまり SCB が 2 回路である場合、電力系統状態フィールドが 1 つあり、設定フィールドが 2 つある。設定フィールドは 6 つの値から成り立っており、これは 2 つの値の 3 ペアである。2 つの値は SCB の閾値とスイッチの開閉状態であり、3 ペアは SCB の運用時に発生する 3 つのイベントに対応している。3 つのペアのうち始めのペアは現在、2 つ目のペアは停電からの復電時、3 つめのペアはタイムアウト時である。タイムアウト時とは、この通知クエリメッセージは定期的にコントローラから送信されてくるものであるが、本来受信できるはずのタイミングで受信できなかったときを指す。SCB は通常状態では始めのフィールドに設定された閾値とスイッチ状態で駆動するが、停電

が発生すると2番目のペアの値を通常状態にコピーし、タイムアウトが発生すると3番目のペアの値をコピーして駆動する。この設計によって、停電の発生と復電と、閾値の設定を独立におこなえる。SCBは停電発生時にすぐさま閾値を変更できる。また通知応答メッセージはペイロードが空である。

ステータス情報クエリメッセージはコントローラに各SCB向けの閾値とスイッチ状態を計算するために用いる。ステータス情報クエリメッセージのペイロードは図5.3に示すように空である。その後ステータス情報応答メッセージがSCBより戻ってくる。このメッセージは3つのフィールド種類、SCBの状態、電力系統の状態、下位回路状態から成り立っている。下位回路状態フィールドはSCBが担当する回路の個数によって異なる。各下位回路状態フィールドには、通知クエリメッセージによって設定された前述6つの値に加えて、その回路を流れた電流の最大電流、平均電流とその分散の3つの値が含まれている。これらの統計値は前回のステータス情報クエリから今回のクエリまでの間の値である。つまり1分ごとの最大電流や平均電流を知りたい場合には1分ごとにクエリを送信する必要がある。コントローラはこの応答メッセージを元に、通知クエリメッセージに格納する3ペアの閾値とスイッチ状態を計算する。

周期的なポーリングはスレーブデバイス(ここではSCB)での大きな消費電力の削減に繋がる。SCBはコントローラからメッセージを受信したときのみ応答を返せばよい。それに加えて通信の周期が決まっているため、SCBは通信部分の電源を受信と送信のタイミングのみ起動すればよい。

図5.4にコントローラの基本動作シーケンスを示す。各SCBの新しい状態を計算するアルゴリズムはupdate関数として与えられる。update関数はSCBの現在の状態(SCB)を与えられ、次の状態を計算する。本章では2種類のアルゴリズム、“Simple”と“Simple + Adaptive”をSCBによる需要制御システムの実験のために実装した。これらのアルゴリズムについての詳細は次の節で解説する。

```

1: procedure CONTROLLER(update,  $\vec{SCB}$ , Interval)
2:                                     ▷ update is user defined function
3:   while 1 do
4:      $\vec{Info} \leftarrow \text{getStatusInformation}(\vec{SCB})$ 
5:      $\vec{NewStatus} \leftarrow \text{update}(\vec{Info})$ 
6:      $\text{sendNotification}(\vec{SCB}, \vec{NewStatus})$ 
7:      $\text{Sleep}(\text{Interval})$ 
8:   end while
9: end procedure

```

図 5.4: コントローラの基本動作シーケンス

またコントローラは、通知クエリメッセージを送信する際に、閾値を下げる幅の大きい順にメッセージをソートして送信していく。それによって、クエリメッセージを送信している最中に停電などの事故が発生したとしても、元々の目的である自家発電装置の供給能力を超えないこと (=安全側での運用) を担保・保証することが出来る。

また、居住者などの人間の行動については、本章で提案する需要制御システムは、可視化システムを持つことにより、この要件の解決を図る。SCB によって計測した電力の需要量と、SCB に設定された閾値をリアルタイムに可視化することで、居住者の行動による需要の変化にフィードバックをかける。居住者は自身の行動による電力需要の変化がどのようになるかを可視化システム経由で確認できるため、SCB の制御を理解した上で行動することができる。加えて SCB の閾値決定のアルゴリズムについて事前に周知をしておくことも重要になる。SCB の閾値は、機器の重要度などを事前にシステムに登録した上で決定する。この重要度なども共有しておくことが必要となる。このように今回の需要制御システムでは、システムは完全に独立して動作し、居住者がシステムに対して対応してもらう形をとる。

このような設計により、前述の要件を下記のように満足させた。

SCB の閾値変更にかかる遅延

コントローラでの閾値とスイッチ状態の計算と、実際の停電時に SCB の閾値変更のタイミングを非同期にすることで解決した。停電が発生したときに、停電時用の閾値とスイッチ状態はすでに前回のコントローラとの通信で与えられている。SCB はこの与えられている値に停電時は即座に切り替えることができる。この動作は数マイクロ秒程度で完了し、要件である数秒程度を十分に満

たす。

人の活動

現在の提案システムでは、居住者の活動について、SCB に対する閾値の計算の際に一切考慮していない。しかしながら提案システムはリアルタイムで更新される状態可視化システムを持つ。居住者がその可視化を見ることで、その値に従って超えないように活動できるような環境を提供する。また可視化システムに表示される閾値設定について問題があった場合にはシステム管理者と相談し、計算アルゴリズムを修正し、より良い閾値設定を得るなど、さまざまな方法で人の活動にかかわる要件を満足させる。

SCB の孤立運転モード

コントローラは接続できない SCB に設定される閾値とスイッチ状態を知ることができるため、その前提で他の SCB の設定値を計算できる。SCB の通知クエリメッセージにタイムアウト時用の閾値とスイッチ状態のフィールドがあり、これはコントローラが設定したものであるため、コントローラは前回正常設定したときのタイムアウト時フィールドの値を参照すれば良い。コントローラは接続できる SCB に対して、適切な閾値を設定することにより制限値を超えることなく安全側でシステムを稼動することができる。

バックアップ電源

マスタ/スレーブの周期的ポーリングの通信を採用したため、提案のシステムは SCB の消費するエネルギー量を抑えて動作できるようになる。それは主に SCB で通信ユニットを、コントローラからメッセージ受信し応答を返答するタイミング以外のほとんどの時間でスリープ状態にすることが可能となるからである。

5.4 システムの数学的モデル化と制御アルゴリズム

SCB はコントローラに与えられた閾値とスイッチ状態で動作する。閾値はコントローラ内に実装された負荷装置の優先度ベースのアルゴリズムと SCB で計測した電流値から計算される。この閾値はいろいろな方法で計算することができるが、実験のために 2 つのアルゴリズムを実装した。これらのアルゴリズムを解説するための数学モデルを次に示す。

$$P_g = (1 + \alpha)P_C \quad (5.1)$$

$$P_g > P_C \geq \sum_{i=0}^N p_c(i) > P_{Lg} \quad (5.2)$$

P_C , P_g , P_{Lg} は各々, 建物の消費電力量, 電力系統の供給能力, 自家発電装置の供給能力の3つの最大値となっている. また α は式 5.1 に示すように, このシステム的设计におけるバッファである. 電力系統が建物の需要量の最大値を満せ, 自家発電装置の供給能力が電力系統の供給能力より低いと仮定する. そして P_{Lg} は式 5.2 に示されるような条件とする. $p_c(1), p_c(2) \dots p_c(N)$ を各 N 個あるサブ電力系統の最大電流値とする.

提案の SCB を用いた需要制御の目的は式 5.3 で表すことができる. $P_{SCB}(1), P_{SCB}(2) \dots P_{SCB}(N)$ を各 N 個あるサブ電力系統の閾値とする. この式のように, なるべくサブ電力系統を止めないように閾値を設定しつつ, SCB の総計の閾値が自家発電装置の供給能力 P_{Lg} を超えないようにする. 各 SCB の閾値は単純に過去実績の最大値を設定するような予測方法から, 機械学習の技術を適用する方法まで幅広く存在する. もっとも単純な方法は, *Simple* と名付ける方法で, 停電まで過去 L 個のサンプリングした電流値の中で一番大きな値を停電時の閾値とする方法である. その結果 SCB の閾値の総計が自家発電装置の供給能力を超えた場合は事前に与えられた優先度が低い順に容量を優先度が高いものに割り振っていく.

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=0}^N P_{SCB}(i) \approx P_{Lg} \\ \text{s.t.} \quad & P_g - \sum_{i=0}^N P_{SCB}(i) > \alpha * P_C \\ & P_{SCB}(i) < p_c(i), i = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (5.3)$$

もう1つの提案アルゴリズムである *Simple + Adaptive* では *Simple* と異なり動的に閾値の計算を自家発電装置の供給中も行い, 閾値を動的に更新する. この方法では過去の *Simple* と同じ過去の最大値と, 事前に設定された各サブ電源系統の優先度を考慮して閾値を設定する. 各サブ電源系統の優先度は整数の数値により, その系統の自家発電装置が駆動した時における重要性を基準にして, 式 5.4 のように設定する. $P_1, P_2, \dots P_N$ は SCB が管理する N 個のサブ系統の優先度を表している.

$$P_1 > P_2 > P_3 \dots \dots \dots > P_N \quad (5.4)$$

この方法では、各 SCB に設定される閾値はリアルタイムで負荷の動きと優先度にあわせて動的に更新される。図 5.5 に詳細な *Simple + Adaptive* の動作を示す。 P_C は前回の通信時に得た各サブ電源系統の需要量を示し、 P_R は図 5.5 のとおり、コントローラで各 SCB に閾値の割り当てを行った後の自家発電装置の残容量を示す。次の閾値である $P_{SCB}(i)$ は $P_C(i)$ が P_R よりも低く余裕がある場合に、 P_R から割り当てる。割り当てを行った場合は、 P_R を更新する。この P_{SCB} の更新プロセスは、すべての回路の閾値に P_C を満たす適切な容量が設定できたか、 P_R の残量がどのサブ電力系統の要求にも満たない状態になるまで続ける。この方法の開始時点の初期値は前述の *Simple* を用い、同様の計算と同じ優先度設定とする。またこれらの計算と設定は、優先度の高い順に行う。これらの提案の手法の評価については次節にて行う。

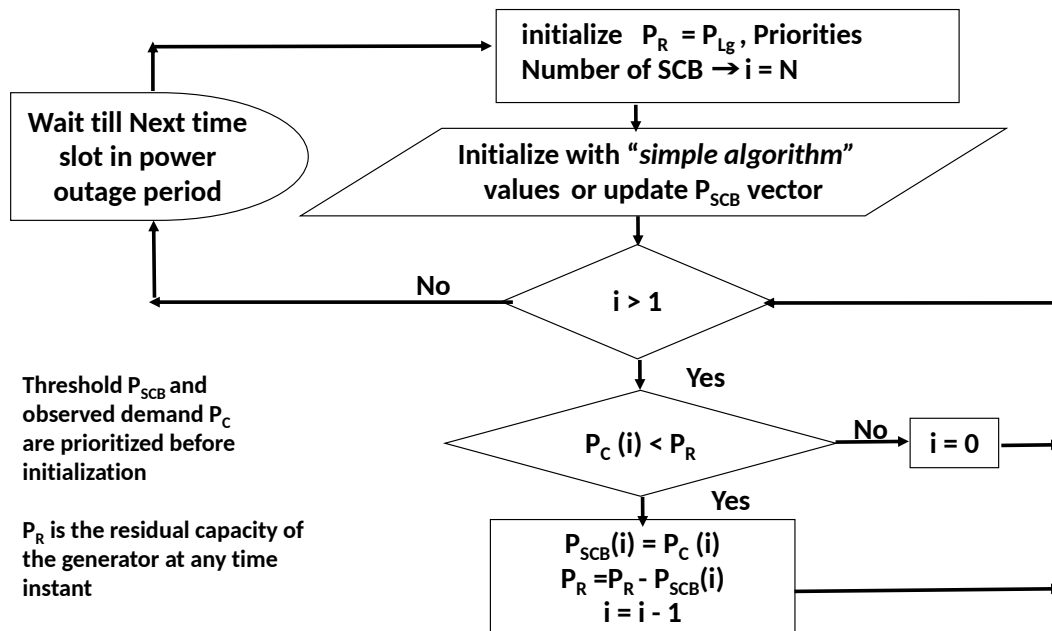


図 5.5: Simple + Adaptive アルゴリズムの動作フローチャート

5.5 需要制御システムの実装と実験

本節では、本提案の検証のためのプロトタイプ実装の詳細と、その実装を用いた実験について述べる。

5.5.1 実装

本稿の実験では、下位に 2 系統のサブ電力系統が繋がることを想定した図 5.6 に示すような SCB を実装した。2 つの電流トランス (U_RD CTL-10-CLS) で系統に流れる電流を計測する。この CT の二次側はマイクロコントローラユニット (ATMEL ATmega328p, 以後 MCU) のアナログデジタルコンバータ (ADC) に接続する。この MCU は内蔵のクロックを用いて 1 kHz の周期で電流値を計測し、計測値 100 個単位 (100 ミリ秒毎) で二乗平均平方根値を計算する。この平均値を元にして、与えられた閾値を超えているか否かを判断し、半導体スイッチにより電力供給を制御する。半導体スイッチ (SHARP S202502) は駆動用の回路を内蔵し、また絶縁もされているためそのまま MCU の汎用デジタル入出力ポートに接続する。コントローラとの通信のためのインタフェースとしては 2.4GHz 無線の ZigBee を用いた。ZigBee モジュール (Digi International XBee-ZB S2) を MCU のシリアル通信ポートに接続した。

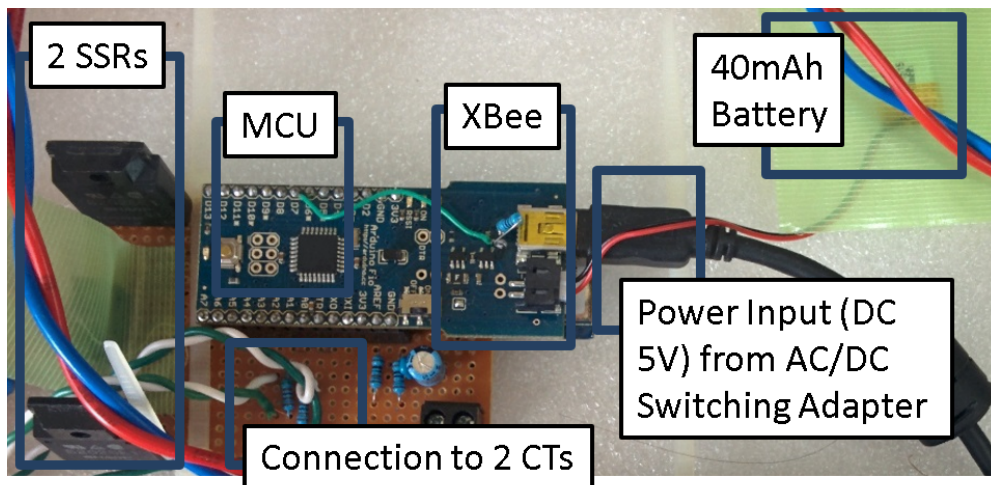


図 5.6: スマート回路遮断機 (SCB) の実装

MCU のソフトウェアでは、内部メモリに格納された閾値を元にサブ電力系統に流れる電流を監視し、閾値を超えるとスイッチを制御する。またコントローラからのデータの有無を確認し、データが存在する場合はそれに対応して内部状態を更新し応答をコントローラへ返す。その後通信モジュールを次の受信タイミングまでスリープモードとする。

停電時の駆動のために、3.7 V/40 mAh のリチウムポリマー電池と、その充放電制御チップを MCU の電源回路に繋いでいる。このバッテリーにより停電時に約 1 時間の動作ができる。

前述の SCB を用いた実験用需要制御システムのプロトタイプについて図 5.7 に示す。図に示されるように、右から左にメイン分電盤、サブ電力系統への配電用分電盤、そしてコンセント部分を模した配置となっている。真ん中の配電用分電盤に SCB を取り付けている。コントローラはラップトップ PC(Lenovo Thinkpad X1 Carbon 2013) で行っており、この PC には ZigBee の通信用インタフェースと停電検出装置の 2 つが USB(Universal Serial Bus) ポートに接続される。停電検出装置は電流トランスと MCU からなっており、10 ミリ秒毎にコントローラに平均電流値を送信する。このプロトタイプでは、2 つのコンセントのうち左側を自家発電装置、右側を電力会社からの供給、つまり電力系統と仮定した。停電検出装置の電流トランスは、メイン分電盤から配電用分電盤に繋がる電力線に取り付けている。この部分の電流がゼロになったときに停電として検出する。配電用分電盤には 4 つサブ電力系統があり、4 つのスイッチがある。ここでは、右上から左下にむかって、SCB-1, SCB-2, SCB-3, SCB-4 と名付けた。実際の実装では、この SCB で現在の回路遮断機を置き換えるようになるため、金属筐体やプラスチック筐体の中に設置される。

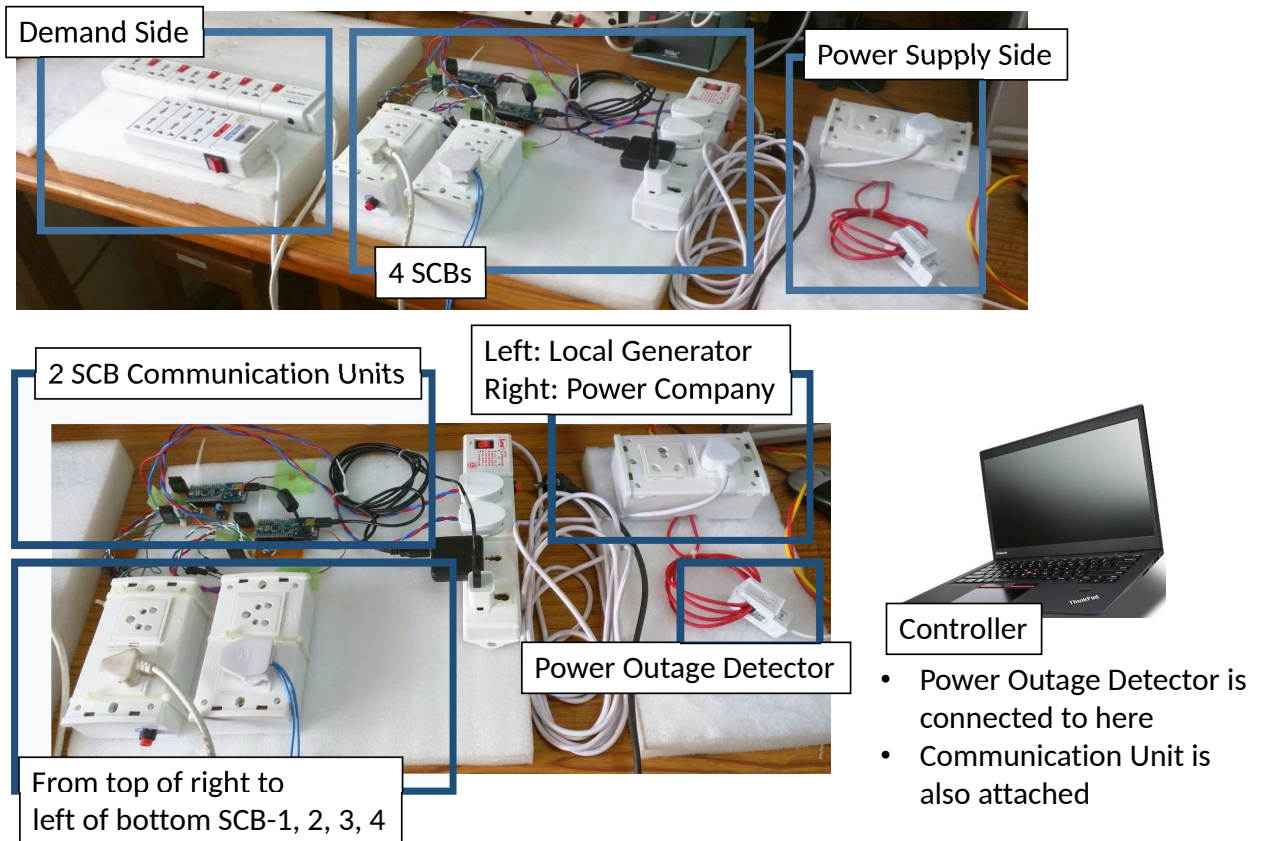


図 5.7: SCB を用いた需要制御システムの実験用配置

可視化システムはコントローラのコンピュータ内に実装された。既存のデータ可視化のためのソフトウェアを改変し、ブラウザ上でリアルタイムに画面が更新されるシステムとなっている。元となったソフトウェアは Grafana[70] と InfluxDB[71] であり、Grafana とは時系列データを可視化するためのソフトウェアであり、InfluxDB は時系列データを記録していくためのデータベースである。この可視化システムでは、各 SCB の現在の閾値設定と、現在の需要を表示する。建物内の居住者は、この可視化システムを自分の端末から表示することで、SCB がどのような設定状態になっているかを知ることができる。

5.5.2 実験と結果

実装されたプロトタイプシステムを用いた実験では、仮想シナリオにあわせて負荷を繋ぎ動作を確認した。この実験で用いられた負荷は照明、空調装置 (以後 AC とする)、コンセント 1 とコンセント 2 (以後 Outlet1 と Outlet2) とした。Outlet1 には、UPS とその先にデスクトップ型のコンピュータを接続している。Outlet2 にはラップトップコンピュータを接続している。また優先度設定では、Outlet1 と Outlet2 にもっとも高い優先度を与え、照明に次点、AC に最も低い優先度を停電時用に与えた。またここでは自家発電装置の出力能力を 2 A と仮定した。実験で用いた仮想シナリオを下記に示す。

1. 電力は電力会社から供給されており、すべての機器が使える。この全ての機器が繋がった際の電流は約 2.3 A である。
2. 電力会社からの電力供給が停止し停電する。停電は 30 秒間発生する。
3. 自家発電装置が起動し、電力供給が復旧する。このときの自家発電装置の出力能力は 2.0 A である。
4. さらにその後数秒後、白熱電球を Outlet2 に追加で接続する。

図 5.8 は前述の仮想シナリオを行なった際の各アルゴリズム、*Simple* と *Simple + Adaptive* での SCB の動作の違いについて示している。紫色の時系列線は実際に負荷装置が流している需要電流であり、青色の線は停電時に用いる閾値である。青色に塗られている時間帯は前述のシナリオ上のはじめの状態を示しており、2 つ目のイベントである停電状態は赤色の領域であり、黄色は自家発電装置での供給開始を示しており、紫色の領域は新しい負荷を Outlet2 に追加したイベントを示している。

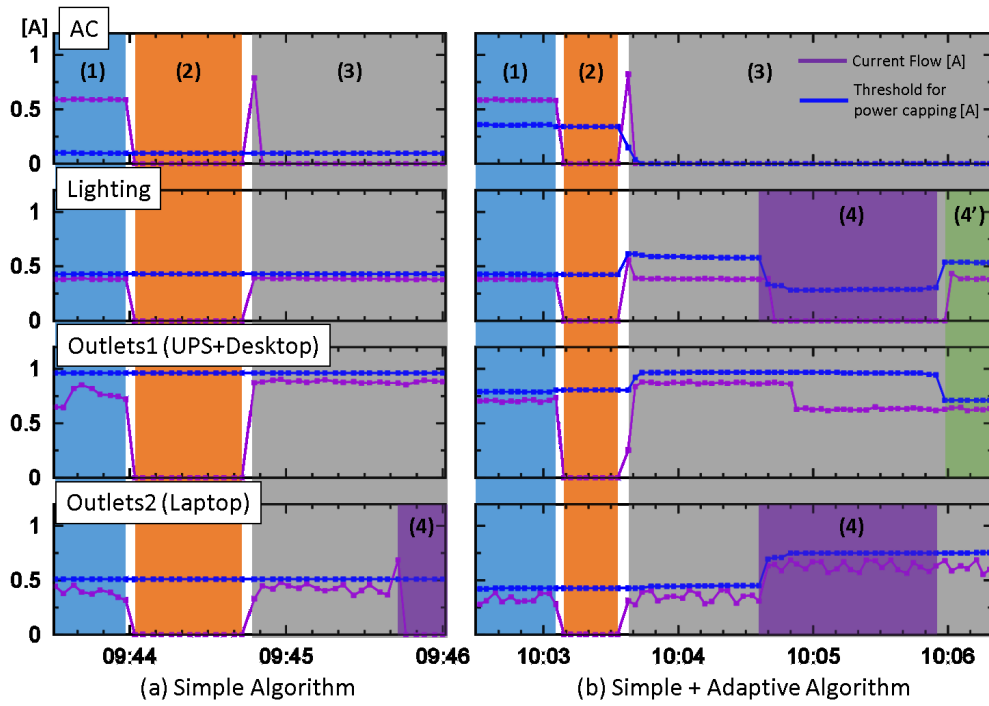


図 5.8: 2つのアルゴリズムでの動作の違いを示す実験結果

各 SCB に設定された閾値を時系列で足し合せた積み上げグラフを図 5.9 に示す。両方のアルゴリズムで、制約である 2.0 A を満足できていることがわかる。この結果についての議論は次の項で述べる。

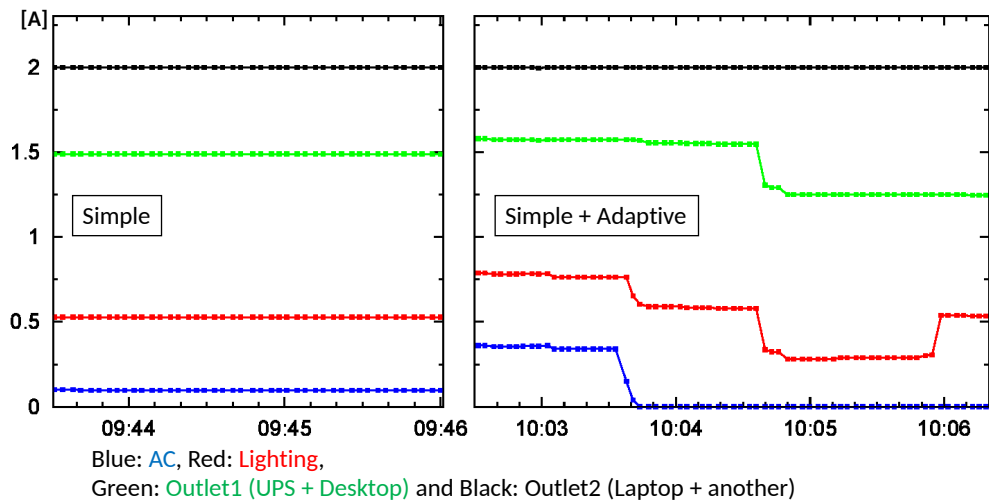


図 5.9: 提案システムが供給能力の制約を満足させることを示す実験結果

2つのアルゴリズムは新しい機器が追加されるまで同じ動作を行っている。そのとき需要が供給能力を超え、Outlet2の電力供給が停止する。*Simple + Adaptive*のアルゴリズムでは、より低い優先度の回路から閾値を取得しOutlet2に与える閾値の再割り当てが行われた。一方*Simple*では再割り当てが行われなかった。*Simple*アルゴリズムを採用したコントローラでは閾値は停電の前の需要にあわせて計算され、停電前に決定される。そのため、居住者が新しい装置をOutlet2に接続した時に、Outlet2は高い優先度を与えているにもかかわらずトリップする。*Simple + Adaptive*アルゴリズムを採用したコントローラでは、閾値の割り当てを優先度にあわせて常に行っていく。

この再割り当ては、Outlet2に新しい機器が追加された紫色の領域で確認できる。Outlet2は照明よりも高い優先度を持っているため、コントローラは照明からOutlet2に閾値を再割り当てする。加えて、さらに時間が経過した後に、高い優先度を持つUPSが再度充電完了した後に、コントローラがこのUPSの閾値の余裕分を再度照明に割り当てなおしている。この動きは図5.8(4)に現れている。結果として、*Simple + Adaptive*アルゴリズムは4つの負荷装置を動作させることに成功している。このように*Simple + Adaptive*アルゴリズムは*Simple*アルゴリズムと比べて、多くの負荷装置を動作させることができ、また自家発電装置の供給能力をより活用できていることがわかる。

5.5.3 結果に対する議論

本項では、実装した2つのアルゴリズムのSCBを用いた需要制御システムと、従来通りの静的なシステムで比較を行った。なお、この比較においては、静的システムのブレーカーの閾値を1Aと仮定して、前述の評価用シナリオを用いて各イベントで何アンペアの電流が流れたかを比較する。そのため、停電時には静的なシステムでは、照明とACの回路の電源を切るとする。表5.2にその比較を示す。静的システムの評価には*Simple + Adaptive*と同じデータを用いている。第4のイベントである自家発電装置での復電後に新しい装置を接続した後、供給能力の使用率は静的システムで50%、*Simple*アルゴリズムの需要制御で55%、そして*Simple + Adaptive*アルゴリズムでは65%となった。それに加えて*Simple + Adaptive*アルゴリズムでは、1分後に再割り当てが発生した影響で、使用率は90%に到達した。つまり従来の静的システムに比べると40%高い使用率となり、従来のシステムより良いとすることができる。

表 5.2: SCB を用いた需要制御システムと従来の静的システムの比較 (単位はアンペア)

| Event No | Conventional breakers (threshold is static 1A) | SCBs and Simple [A] | SCBs and Simple + Adaptive [A] |
|----------|--|---------------------|--------------------------------|
| 1 | 2.3 | 2.2 | 2.3 |
| 2 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0.8 | 1.4 | 1.55 |
| 4 | 1.0 | 1.1 | 1.3, 1.8 (after 1min) |

上記に示したように、SCB を用いた需要制御システムは設計通りに動作をすることを、仮想シナリオで確認できた。しかしながら、この実験は小型のプロトタイプを用いたものであり、より大きい実環境規模の実装と実験をすることが期待される。今回の実験のプロトタイプでは、自家発電装置の能力を 2 A と仮定し、また開発した SCB も 2 回路用である。実際の環境では 100 A 程度の供給能力があり、また 1 つの分電盤も 30 回路程度は持つため SCB も同様の大きさにすることが求められる。しかしながら停電が発生する環境において、回路遮断機レベルで遮断値を最適に設定することにより、より大きな使用率が得られること、とシステムが実現可能なことを示すことはできた。

また、今回のプロトタイプでは無線通信の ZigBee を用いているが、これについても他の通信技術を検討・評価する必要があるであろう。通常回路遮断機は金属箱の中に収容されるため、無線通信との相性はそれほど高くない。実際の環境では PLC(Power Line Communication) が必要になる。本論文の前章までで述べてきた、Z3C は電流を用いることの特長上、ブレーカーと建物の根本であれば安定した通信を提供できるため、Z3C を用いた実装を行うことも今後重要となる。Z3C では接続機器識別の機能も有するため、優先度設定を自動化するなどのことも出来るようになる。その一方で、近代の建物は Wi-Fi 環境を有する機会が多く、回路遮断機収容用の金属箱の外にアンテナを取り付けるなどの形で Wi-Fi を用いた SCB 実装についても考えることができる。これらのさまざまな技術の組合せでの最適な実装を考えていくことも今後の課題となる。

本章では停電対策のために自家発電装置を設置している環境向けに設計を行った。一方、近年の再生可能エネルギーの側面での検討も必要になる。太陽光発電を有する建物の場合、建物の供給能力は電力系統と太陽光発電の足し合せとなるが、太陽光からの供給エネルギー容量は時間変化する。このような場合に SCB を用いて太陽光発電が無い場合に需要を制御することは有用である。

しかしながら今回の実装と設計では、停電期間を各 SCB の同期に用いているため、グリッド連携型のインバータを用いている太陽光発電の場合には、直接応用できない。グリッド連携型のインバータを用いている場合でも使用できる SCB 間の同期方法を準備した上で、そういった環境向けの SCB による需要制御システムを今後研究することが必要となるであろう。

5.6 まとめ

本章では、自家発電装置を有するマイクログリッド環境において、停電時に自家発電装置の最適利用が実現できるスマートサーキットブレーカー (SCB) を用いた需要制御システムを提案し、その評価を行った。提案システムは、停電時に従来の静的な方法と比べてより多くの機器が使えるようになるなど利便性の向上に貢献できると考えられる。提案した SCB を用いた需要制御システムは、建物向けに設計され、SCB の閾値を動的に変化させる。この閾値設定のためのアルゴリズムとして *Simple* と *Simple + Adaptive* を提案し、実験用のプロトタイプシステムにより設計通りに動作することを確認することができた。さらに従来の静的なシステムとの比較を行い、最適なシナリオにおいては、40% 程度の使用率向上を実現できることを示すことができた。

5.7 その他の応用先

5.7.1 家電製品の状態監視

本論文で述べてきた Z3C は、親子通信を前提としている。このアプリケーションとして家電製品の電源部に子機を配置し、電力メータを親機とした接続機器の自動認識とそれを用いた家電製品の状態監視システムがある。

100 V のコンセントに繋がった家電製品の異常などを監視することは本来重要なことであるが現状行われていない。家庭内の電力線は電気エネルギーを供給するのみで、異常検知の仕組みは回路遮断機の設置による過電流保護程度である。例えば、家電製品の製造者が不良のある家電製品をリコールする際はテレビなどを用いて広く長い期間広告をすることが必要である。スマートメータが下位に設置された家電製品を認識していれば、リコールのような作業は自動化し、技術的に解決することができる。

また、IoT・M2M の流れにより、HEMS(Home Energy Management System) などが導入されている。現在は主に消費電力の可視化などを実現しているが、今後は機器の自動識別と状態監視

なども含んでいくと考えられる。そのような中でも Z3C を用いた通信を行うことでより高度な制御や監視も実現可能となることが期待される。

5.7.2 直流システムへの適用

電流を用いた電力線通信は直流システムにも適用可能である。本節では、太陽光発電所用のパネル検査システム向けに開発した電流型電力線通信について述べる。本節の詳細な内容については、参考文献 [72] が詳しい。

太陽光発電では、太陽光発電 (PV: Photovoltaics) パネルの監視が重要なタスクになる。PV パネルの故障にはいろいろな種類があるが、セルや内部部品の故障など外見からでは判断がつかない故障もある。これらを検知するためには、各 PV パネルの発電状況を個別に監視する必要がある。しかしながら各パネルごとにデータ線を配線するような方式は配線コストが高く、また、無線方式では通信用の LSI が必要となりパネルのコストが高くなってしまふ。そこで電力線通信 (PLC) を用いたパネル監視システムを考える。

PV パネル向けの電力線通信を考えるために、まず太陽光発電所での PV パネルの配線について述べる。PV パネルは、まず直列に接続され数百から一千ボルト程度まで電圧を高める。この1つの直列接続されたグループをストリングと呼ぶ。次に複数のストリングを並列接続する。このストリング群をアレイと呼ぶ。そしてアレイを PV 用パワーコンディショナへ接続する。パワーコンディショナとは DC-AC のインバータまたは DC-DC コンバータであり、加えて PV の出力特性である I-V 特性にあわせて PV アレイから取り出す電圧と電流を制御する。

従来の PLC を適用する場合、ストリングが課題となる。ストリングでは PV パネルが直列接続されており、また PV パネルは電流源であるため、PLC の電圧にのせた信号は各 PV パネルには伝わらない。一方電流型の PLC であれば、信号はストリング全体を各パネルを超えて伝搬することができる。また電流の特性により、パワーコンディショナとのループを形成する配線上に安定して信号が重畳可能となる。これにより、無線方式のように遮へい物によって繋がらないという問題も発生しにくくすることができる。

電流信号を発生させるための回路にはいくつかの方式が考えられる。本論文で述べてきた Z3C のような回路を抵抗負荷でショートすることで信号を発生させる方式も参考文献 [72] で研究している。太陽光発電の監視タスクにおいては、通信の高速性は重要ではなく数バイトのデータを1分に一度ないし1時間に一度程度送信すればよいだけである。電流発生回路も大幅に簡略化でき、専用の LSI などを含まないコストの安い通信機で実現することが可能である。

第6章

結論

6.1 今後の課題

6.1.1 通信路のモデル化とシミュレータの開発

本論文では、提案する電流型の電力線通信が良好に動作することを実機によるプロトタイプシステムで確認することができた。このときの通信路に関する電気モデルは、プロトタイプの動作をもとにしてまとめた。提案通信手法に関する研究をより深くすすめていくためには、シミュレータの開発が必要である。

通信シミュレータ開発のためには、電気的特性とネットワークシミュレータを繋ぐ研究が不可欠であり、今後はそれらの研究開発を行っていくことが必要である。提案である Z3C が行う低圧での電流型電力線通信は、その影響範囲を正確に把握するには至っていない。したがって、低圧高圧トランスや変電所、そして発電所を含めた系統の中で、提案システムがどのように動作するのか、またどのような影響を及ぼすのかを、正確に理解・分析する必要がある。

6.1.2 通信セパレータの開発

提案した電流型電力線通信で用いる信号送信のための電流パルスは、原則として閉路上全体を流れる。例えば、コンセント・プラグ間と、コンセント・回路遮断機間に別々の通信を行いたい場合、この特性は大きな問題となる。この問題を解決する通信セパレータの開発が必要となる。

この通信セパレータの実現方法としては、論理的な方式と物理的な方式の2つの方式が考えられる。論理的な方式とは電流パルスの信号方式を工夫することで、信号が混ざり合った場合でもきち

んと後で弁別できるようにする信号符号化と信号処理方法である。物理的な方式とは、電流ループを物理的に途中で終端する方式である。

6.1.3 力率改善回路との共有

提案した電流パルスによる通信が現実社会で実際に使われるようにするためには、接続機器の電源回路に通信機の回路を組込む必要がある。そのための導入コストを下げるために、スイッチング電源内部に含まれる力率改善回路を応用することで本提案通信を実現するような仕組みについての研究が必要である。

力率改善回路は、スイッチング電源の入力コンデンサに対して、電源系統側の交流電圧がコンデンサの端子電圧よりも低い場面であっても電荷を充電する回路である。その構成はコイルとFET、ダイオード、FETを駆動させる電源管理ICから成る。このコイルに蓄えられた電磁エネルギーを放出することで昇圧を行い、電圧が低いタイミングでも電流を供給し、スイッチング電源の力率を改善することが可能となる。

力率改善回路を駆動する電源管理ICのプログラムを変更することで、提案のZ3Cを実現することができると考えられる。この方法は、通信回路のコストを大幅に下げることができるという利点がある。実際には電源管理ICに当該機能を載せることの実現可能性についての研究も必要となる。

6.2 技術・学術的貢献

本節で本研究の貢献をまとめる。

電力線通信における電流型・電圧型という新しい分類軸 (第2章)

従来の電力線通信では行われてこなかった分類軸を提案した。電流型と電圧型という新しい分類軸を用いることで、UNB-PLCをより細かく分類することができた。さらに電流型について、引き込み式と押し込み式という2つの分類方式を提案し、既存研究の分類を行った。

電流型電力線通信の応用先 (第2章)

上記に加えて、電流型の電力線通信の特徴であるループ上にもみ信号が観測できるという特徴を、接続機器識別というスマートグリッド上の要求課題の解決に応用できることを示した。

抵抗負荷を用い電流パルスの形状を制御できる電流型電力線通信 (第 3 章)

従来の電流型電力線通信が実現したデータ通信速度よりもより高速なデータ通信速度を実現した。低圧環境かつ抵抗負荷を用いることで電流パルスの形状を制御することにより、パルス幅に値を重畳することに成功したことに起因する。

電流ブロックによる逆方向通信 (第 4 章)

第 3 章で提案した回路と同じような、回路を抵抗でショートする親機を、電源の上位に設置することで、下位側の通信機が引き込める電流が下る現象を利用し、上位から下位へのデータ通信を実現した。

Z3C 向けの新しい媒体アクセス制御 (第 4 章)

上記に加えて、通信を下位から起動する必要があるという特殊な物理特性に適合可能な媒体アクセス制御 (MAC) 方法を提案した。提案 MAC 方法によって、双方向多機器通信が可能となることをプロトタイプシステムを用いて確認・評価することができた。

回路遮断機単位での自動需要応答 (第 5 章)

本研究で提案してきた電流型の電力線通信を効果的に使用可能なアプリケーションとして、回路遮断機を用いた自動需要応答システムを提案した。コンセント単位よりも一段階上流で需要制御することにより、設置機器数を大幅に削減することができることを確認することができた。実証実験においては、供給側の制約を満足するような動作を確認、回路遮断機を用いた電力需要制御の有用性・可能性・実用性が確認できた。

6.3 おわりに

本論文では、抵抗負荷による回路短絡を用いた電流型の新しい電力線通信の提案と実装・評価、さらに、提案電力線通信方式を有効に利用可能なこれまでには存在しない電力需要制御システムを提案・実装し実験評価を行った。これら本論文の研究成果は、今後のスマートグリッドシステムの中で利用ならびに応用されることを期待している。

参考文献

- [1] 荒川文生, 長尾待士. 電力系統技術の歴史的研究. 電気学会論文誌. A, 基礎・材料・共通部門誌, Vol. 121, No. 1, pp. 25–31, 2001.
- [2] 一般社団法人日本電気協会. 澁澤元治伝. 澁澤賞 50 年のあゆみ, pp. 1–14, 2005.
- [3] X. Fang, S. Misra, G. Xue, and D. Yang. Smart grid – the new and improved power grid: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Vol. 14, No. 4, pp. 944–980, Fourth 2012.
- [4] Luigi Atzori, Antonio Iera, and Giacomo Morabito. The internet of things: A survey. *Comput. Netw.*, Vol. 54, No. 15, pp. 2787–2805, October 2010.
- [5] Cristina Cano, Alberto Pittolo, David Malone, Lutz Lampe, Andrea M. Tonello, and Anand Dabak. State-of-the-art in power line communications: from the applications to the medium. *CoRR*, Vol. abs/1602.09019, , 2016.
- [6] M. S. Yousuf and M. El-Shafei. Power line communications: An overview - part i. In *Innovations in Information Technology, 2007. IIT '07. 4th International Conference on*, pp. 218–222, Nov 2007.
- [7] M. S. Yousuf, S. Z. Rizvi, and M. El-Shafei. Power line communications: An overview - part ii. In *Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, 2008. ICTTA 2008. 3rd International Conference on*, pp. 1–6, April 2008.
- [8] 片山正昭. 電力線通信. 計測と制御, Vol. 44, No. 6, pp. 378–383, 2005.
- [9] Y. Yan, Y. Qian, H. Sharif, and D. Tipper. A survey on smart grid communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Vol. 15, No. 1, pp. 5–20, First 2013.
- [10] U. Herberg, D. Mashima, J. G. Jetcheva, and S. Mirzazad-Barijough. Openadr 2.0 deployment architectures: Options and implications. In *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2014 IEEE International Conference on*, pp. 782–787, Nov 2014.

- [11] OpenADR Alliance. Openadr 2.0 profile specification a profile, Jul 2011.
- [12] OpenADR Alliance. Openadr 2.0 profile specification b profile, Jul 2013.
- [13] Department of Energy. Buildings share of u.s. electricity consumption/sales, 2012.
- [14] 経済産業省. エネルギー白書: 2015 年版. 経済産業調査会, 2015.
- [15] 川口淳一郎. 「はやぶさ」電力制御技術を応用したサーバーを要しない、家庭、オフィス向けエネルギーマネジメントシステムの提案. https://shingi.jst.go.jp/past_abst/abst/p/15/jaxa/jaxa01.pdf, 2015. [Online; accessed 23-September-2016].
- [16] Donald J Hammerstrom, Jerry Brous, David P Chassin, Gale R Horst, Robert Kajfasz, Preston Michie, Terry V Oliver, Teresa A Carlon, Conrad Eustis, Olof M Jarvegren, et al. Pacific northwest gridwise testbed demonstration projects; part ii. grid friendly appliance project. Technical report, Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (US), 2007.
- [17] D. Dzung, I. Berganza, and A. Sendin. Evolution of powerline communications for smart distribution: From ripple control to ofdm. In *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2011 IEEE International Symposium on*, pp. 474–478, April 2011.
- [18] Stefano Galli, Anna Scaglione, and Zhifang Wang. For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid. *CoRR*, Vol. abs/1010.1973, , 2010.
- [19] Sioe T. Mak and Don L. Reed. Twacs, a new viable two-way automatic communication system for distribution networks. part i: Outbound communication. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, Vol. PAS-101, No. 8, pp. 2941–2949, Aug 1982.
- [20] Sioe Tho Mak and Thomas G. Moore. Twacs, a new viable two-way automatic communication system for distribution networks. part ii: Inbound communication. *Power Engineering Review, IEEE*, Vol. PER-4, No. 8, pp. 51–51, Aug 1984.
- [21] K. H. Afkhamie, S. Katar, L. Yonge, and R. Newman. An overview of the upcoming homeplug av standard. In *International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 2005.*, pp. 400–404, April 2005.
- [22] HD-PLC Alliance, 2016. [Online; accessed 20-September-2016].
- [23] V. Dominguez. Upa proposal for the coexistence of plc networks. In *2006 Digest of Technical Papers International Conference on Consumer Electronics*, pp. 157–158, Jan 2006.
- [24] IEEE. IEEE standard for broadband over power line networks: Medium access control

- and physical layer specifications. *IEEE Std 1901-2010*, pp. 1–1586, Dec 2010.
- [25] S. Galli, A. Kurobe, and M. Ohura. The inter-phy protocol (ipp): A simple coexistence protocol for shared media. In *Power Line Communications and Its Applications, 2009. ISPLC 2009. IEEE International Symposium on*, pp. 194–200, March 2009.
- [26] E. Mainardi and M. Bonfe. *Powerline Communication in Home-Building Automation Systems*. INTECH Open Access Publisher, 2008.
- [27] PRIME Alliance Technical Working Group. Prime v1.4 white paper, 2014.
- [28] K. Razazian, M. Umari, A. Kamalizad, V. Loginov, and M. Navid. G3-plc specification for powerline communication: Overview, system simulation and field trial results. In *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2010 IEEE International Symposium on*, pp. 313–318, March 2010.
- [29] ITU. Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for g3-plc networks. *ITU-T G.9903*, pp. 1–226, Feb 2014.
- [30] IEEE. IEEE standard for low-frequency (less than 500 khz) narrowband power line communications for smart grid applications. *IEEE Std 1901.2-2013*, pp. 1–269, Dec 2013.
- [31] M. Hoch. Comparison of plc g3 and prime. In *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2011 IEEE International Symposium on*, pp. 165–169, April 2011.
- [32] Panasonic. フル 2 線式リモコン. http://www2.panasonic.biz/es/densetsu/bs/lighting_control/full12/pdf/full12pdf/SSCT1B235.pdf, 2010. [Online; accessed 23-September-2016].
- [33] Hermon Laboratories TI Ltd. Analog telephony compliance requirements overview. <http://www.hermonlabs.com/products/innerData/pdf/Analog%20Telephony%20overview.pdf>, 2009. [Online; accessed 23-September-2016].
- [34] 国際通信の日本史: 植民地化解消へ苦闘の九十九年. 東海大学出版会, 1999.
- [35] F. Di Napoli, P. Guerriero, V. d’Alessandro, and S. Daliento. A power line communication on dc bus with photovoltaic strings. In *Renewable Power Generation Conference (RPG 2014), 3rd*, pp. 1–6, Sept 2014.
- [36] S. Tsuzuki and Y. Yamada. Feasibility study of ubiquitous sensor networks by inductively coupled plc over pv power systems. In *Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 2015 International Symposium on*, pp. 274–279, March 2015.
- [37] Osama Bilal, Er Liu, Yangpo Gao, and Timo O. Korhonen. Design of broadband coupling

- circuits for powerline communication. In *Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 2004 International Symposium on*, pp. 1–6, March 2004.
- [38] L.T. Berger, A. Schwager, P. Pagani, and D. Schneider. *MIMO Power Line Communications: Narrow and Broadband Standards, EMC, and Advanced Processing*. Devices, Circuits, and Systems. CRC Press, 2014.
- [39] N. Pavlidou, A.J.H. Vinck, J. Yazdani, and B. Honary. Power line communications: state of the art and future trends. *Communications Magazine, IEEE*, Vol. 41, No. 4, pp. 34–40, April 2003.
- [40] Acromag. Introduction to the two-wire transmitter and the 4-20ma current loop. *Whitepaper*, pp. 1–8, Aug 2015.
- [41] Manny Soltero, Jing Zhang, and Chris Cockrill. 422 and 485 standards overview and system configurations. *Texas Instruments Application Report*, pp. 1–33, Jun 2002.
- [42] Andreas Reinhardt, Paul Baumann, Daniel Burgstahler, Matthias Hollick, Hristo Chonov, Marc Werner, and Ralf Steinmetz. On the accuracy of appliance identification based on distributed load metering data. In *Proceedings of the 2nd IFIP Conference on Sustainable Internet and ICT for Sustainability (SustainIT)*, pp. 1–9, 2012.
- [43] Takekazu Kato, H. Cho, Dongwook Lee, T. Toyomura, and T. Yamazaki. Appliance recognition from electric current signals for information-energy integrated network in home environments. *Ambient Assistive Health and Wellness Management in the Heart of the City*, pp. 150–157, 2009.
- [44] SAE. Sae j1772: Electric vehicle and plug in hybrid electric vehicle conductive charge coupler, Jan 2010.
- [45] Sony develops “authentication outlet” where electricity use can be managed and consumed on a per-user and per-device basis, 2012.
- [46] 斎藤浩海, 宮森敏, 島田亘, 豊田淳一. 開放型電力ネットワークにおける自律分散的電力流通を実現する機構の基礎検討. 電気学会論文誌. B, 電力・エネルギー部門誌 = The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. B, A publication of Power and Energy Society, Vol. 117, No. 1, pp. 10–18, dec 1996.
- [47] 引原隆土. 電力のパケット化とルーティング技術. 情報処理, Vol. 51, No. 8, pp. 943–950, aug 2010.
- [48] 美齊津宏幸, 鈴木大, 山崎雅生, 中城陽, 齊藤安徳, 丹羽章裕, 中村達也, 竹内伸二, 井出崎功, 竹本聡, 中野崇史. 低周波電力線搬送方式の配電系統における伝送特性. 電気学会研究会資料.

- CMN, 通信研究会, Vol. 2011, No. 1, pp. 53–59, jan 2011.
- [49] 北川勝浩. 屋内高速電力線搬送通信からの漏洩電界と電波共存上の問題. 生産と技術, Vol. 59, No. 2, pp. 69–73, 2007.
- [50] 北川勝浩. 屋内高速電力線搬送通信からの漏洩電界と電波共存上の問題 (2). 生産と技術, Vol. 59, No. 4, pp. 1–3, 2007.
- [51] Jingkun Gao, Suman Giri, Emre Can Kara, and Mario Bergés. PLAID: A public dataset of high-resolution electrical appliance measurements for load identification research: Demo abstract. In *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Systems for Energy-Efficient Buildings*, BuildSys '14, pp. 198–199, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [52] HART Communications - Samson AG Mess. https://www.samson.de/pdf_en/1452en.pdf, 2015. [Online; accessed 23-September-2016].
- [53] Lars Torsten Berger, Andreas Schwager, and J. Joaquin Escudero-Garzas. Power line communications for smart grid applications. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 2013, p. 16, 2013.
- [54] IEC. *IEC 60227-3 (1993): Polyvinyl chloride insulated cables of rated voltages up to and including 450/750 V - Part 3: Non-sheathed cables for fixed wiring*. 1993.
- [55] BP. Statistical review of world energy, 2014.
- [56] Vasileios Kontorinis, Liuyi Eric Zhang, Baris Aksanli, Jack Sampson, Houman Homayoun, Eddie Pettis, Dean M. Tullsen, and Tajana Simunic Rosing. Managing distributed ups energy for effective power capping in data centers. *SIGARCH Comput. Archit. News*, Vol. 40, No. 3, pp. 488–499, June 2012.
- [57] Abusayeed Saifullah, Sriram Sankar, Jie Liu, Chenyang Lu, Ranveer Chandra, and Bodhi Priyantha. Capnet: A real-time wireless management network for data center power capping. In *IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS)*. IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers, December 2014. IEEE RTSS Best Paper.
- [58] Hao Chen, M.C. Caramanis, and A.K. Coskun. The data center as a grid load stabilizer. In *Design Automation Conference (ASP-DAC), 2014 19th Asia and South Pacific*, pp. 105–112, Jan 2014.
- [59] Kai Ma and Xiaorui Wang. Pgcapping: Exploiting power gating for power capping and core lifetime balancing in cmps. In *Proceedings of the 21st International Conference on Parallel Architectures and Compilation Techniques*, PACT '12, pp. 13–22, New York, NY,

- USA, 2012. ACM.
- [60] Howard David, Eugene Gorbato, Ulf R. Hanebutte, Rahul Khanna, and Christian Le. Rapl: Memory power estimation and capping. In *Proceedings of the 16th ACM/IEEE International Symposium on Low Power Electronics and Design, ISLPED '10*, pp. 189–194, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [61] Colin Dixon, Ratul Mahajan, Sharad Agarwal, A.J. Brush, Bongshin Lee, Stefan Saroiu, and Paramvir Bahl. An operating system for the home. In *Presented as part of the 9th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 12)*, pp. 337–352, San Jose, CA, 2012. USENIX.
- [62] Stephen Dawson-Haggerty, Andrew Krioukov, Jay Taneja, Sagar Karandikar, Gabe Fierro, Nikita Kitaev, and David Culler. Boss: Building operating system services. In *Presented as part of the 10th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 13)*, pp. 443–457, Lombard, IL, 2013. USENIX.
- [63] N. Javaid, I. Khan, M. N. Ullah, A. Mahmood, and M. U. Farooq. A survey of home energy management systems in future smart grid communications. In *Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), 2013 Eighth International Conference on*, pp. 459–464, Oct 2013.
- [64] Xiaofan Fred Jiang. *A High-Fidelity Energy Monitoring and Feedback Architecture for Reducing Electrical Consumption in Buildings*. PhD thesis, EECS Department, University of California, Berkeley, Sep 2010.
- [65] Thomas Weng, Bharathan Balaji, Seemanta Dutta, Rajesh Gupta, and Yuvraj Agarwal. Managing plug-loads for demand response within buildings. In *Proceedings of the Third ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings, BuildSys '11*, pp. 13–18, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [66] ECHONET CONSORTIUM. Echonet lite specification version 1.00, 2012.
- [67] Konnex Association. Knx specification, 2004.
- [68] Z-Wave Alliance. Z-wave: Home control. <http://www.z-wave.com/>, 2013. [Online; accessed 23-March-2015].
- [69] Denyo Co. DCA Series, Products Information. <http://www.denyo.co.jp/chinese/products/pdf/dca-esx.pdf>, 2007. [Online; accessed 23-March-2015].
- [70] Torkel degaard & Coding Instinct AB. Grafana. <http://grafana.org/>, 2013. [Online; accessed 27-March-2015].

- [71] Influxdb. <http://influxdb.com/>, 2015. [Online; accessed 27-March-2015].
- [72] Hideya Ochiai and Hiroyuki Ikegami. PPLC-PV: A pulse power line communication for series-connected pv monitoring. In *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2016 IEEE International Conference on*, Nov 2016.

発表文献と研究活動

(1) 査読付き論文誌

- (a) 池上洋行, 落合秀也, 塚田学, 新居英明, 江崎浩, 商用電源における電圧零交差点での電流制御による通信とパルス幅符号化, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J99-B, No.7, pp.490-500, Jul. 2016.

(2) 査読付き国際学会

- (a) Hideya Ochiai, Hiroyuki Ikegami, PPLC-PV: A pulse power line communication for series-connected pv monitoring. IEEE SmartGridComm 2016, Sydney, Australia, November 2016.
- (b) Hiroyuki Ikegami, Manabu Tsukada, Hideya Ochiai, Hideaki Nii, Hiroshi Esaki, Electric current based Power Line Communication for Plug-load auto identification, IEEE SmartGridComm 2015, Miami, USA, November 2015.
- (c) Hiroyuki Ikegami, Raja Vara Prasad Yerra, P. Rajalakshmi, Hiroshi Esaki, Real time Power Capping with Smart Circuit Breaker to maximize Power Utilization of Local Generator, IEEE BIOT 2015 (2nd IEEE International Workshop on Big Data Management for the Internet of Things), Taichung, Taiwan, July 2015.

(3) 特許

- (a) 落合秀也, 池上洋行, 太陽光ストリングにおける電流信号の送信装置, 特願 2016-130122
- (b) 池上洋行, 新居英明, 落合秀也, 塚田学, 江崎浩, 弘津研一, 下口剛史, 浅尾芳久, 電力線通信システム及び電力線通信の通信方法, 特願 2015-214316

謝辞

本論文をまとめるにあたってお世話になった方々への感謝を述べさせていただきます。

自分の修士・博士課程において常に様々な方々と研究に関する議論やフィードバックを頂きました。その多様な人間関係の中で、一番自分が影響を受けたのは、指導教員の創造情報学専攻教授江崎浩先生です。修士・博士と江崎研究室で研究を行う中で、具体的な知識などに加え、研究者としての姿勢・態度のようなものについて大きな影響を受けました。「自分の好きなことをやれ」と言う先生の指導方針はとても苦しい物であり5年間試行錯誤の連続でした。しかし、非常におおくの失敗を経験しながらも、自分独自の研究テーマを掘り下げることができました。結果として、博士論文を執筆することに今日至っています。この事実は自分にとって改めて非常に重要なことであると、今この文章を書きながらも感じています。このような機会と環境を与えてくださったこと、本当に感謝しております。ありがとうございました。

本論文の主たる研究トピックである、電流型の電力線通信というテーマの着想は修士時代に得たものです。当時は電子回路の知識も零に等しく、本論で述べたようなことが実現可能であるかどうか自信を持つことができませんでした。そのような中、荒削りな状態のアイデアから適切な研究へのポイントを下さった電子情報学専攻教授 浅見徹先生に深く感謝しています。博士1年の夏に教えて頂いた TWACS の論文を読んだことで、それから自信をもって研究に取り組むことができました。また実験装置の回路設計では IIJ 技術研究所 新居英明博士にも多大なる支援と指導を頂きました。新居英明博士からの支援・指導を受ける前は、知識が足りず実験回路が毎日のように燃えあがっておりました。とくにどのように電子回路を見ていけばいいか、作ればよいかなど非常に多くのことを学ばせて頂き、実験結果が取れるような回路を仕上げることができました。住友電気工業株式会社 弘津研一博士には、電力線通信の専門家として各技術の課題や立ち位置など、論文調査からでは判らない数多くの知見を頂きました。電子情報学専攻講師 落合秀也先生と創造情報学専攻助教 塚田学先生から日常の研究活動、論文への具体的な修正案など多くの指導を頂きました。また、本論文のもう1つの研究トピックである需要制御について、共に研究を行なったインド工科大学ハイデラバード校准教授 P. Rajalakshmi 先生と、当時同校の博士課程学生で現インド情報技

術大学 Sri City 校助教 Raja Vara Prasad Yerra 先生にも多くの指導と刺激を頂きました。ここで挙げたみなさまのご支援とご指導なくして本研究は遂行できませんでした。

また本論文をまとめるに当って、博士論文審査委員として論文に対しさまざまなコメントを頂いた、創造情報学専攻教授 山西健司先生，創造情報学専攻 稲葉雅幸先生，創造情報学専攻講師 中山英樹先生にも深く感謝しております。予備審査会でいただいた様々なコメントのおかげで、本論文の内容がより正しく・良くなったことを実感しております。とくに、評価に関する部分について、既存研究との比較方法等おおくの学びがありました。

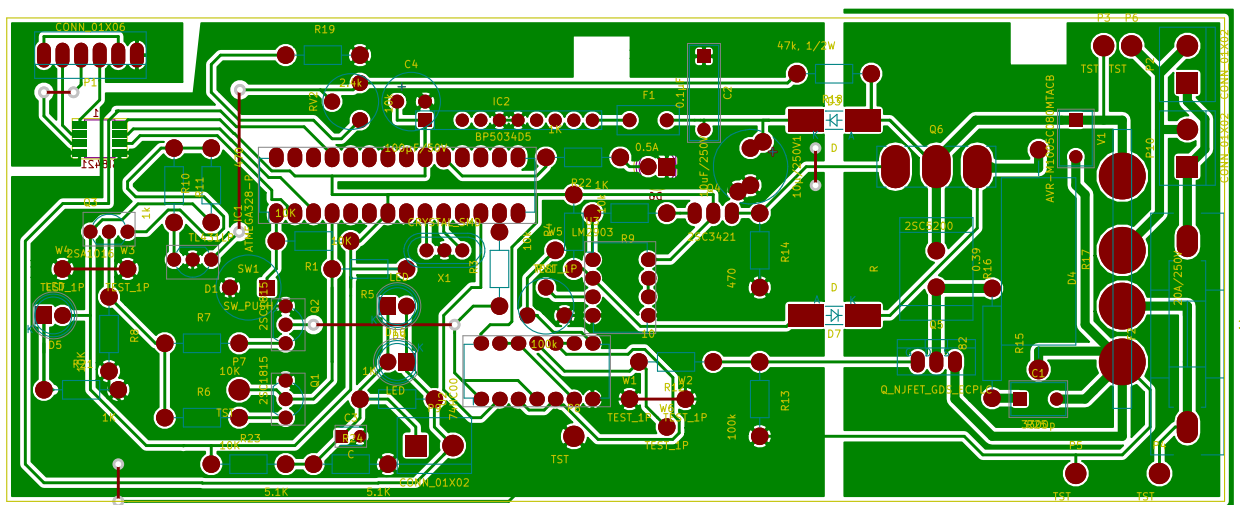
最後に、ここに挙げることのできなかつた色々コメントをくれた人達，同じ時間と場所をすごした江崎・落合研究室の面々，GCL プログラムで繋がっている方々とは，とてもここには書き切れないほどのさまざまな出来事がありました。すでに卒業・修了した人も含めて本当にお世話になりました。

本研究の一部は、文部科学省博士課程教育リーディングプログラム「東京大学ソーシャル ICT グローバル・クリエイティブリーダー育成プログラム」の支援により行われました。

付録 A

プロトタイプ通信機の詳細仕様

A.1 フットプリント



A.2 部品表

| Reference | Value | Footprint |
|-----------|---------|--|
| Q4 | 2SC3421 | TO`SOT`Packages`THT:TO-220`Neutral123`PadsOnly |
| R14 | 470 | Resistors`ThroughHole:Resistor`Horizontal`RM10mm |
| R17 | 0.39 | Resistors`ThroughHole:Resistor`Horizontal`RM30mm |
| F2 | 1A | ecplc:Fuse`Holders5x25mm |

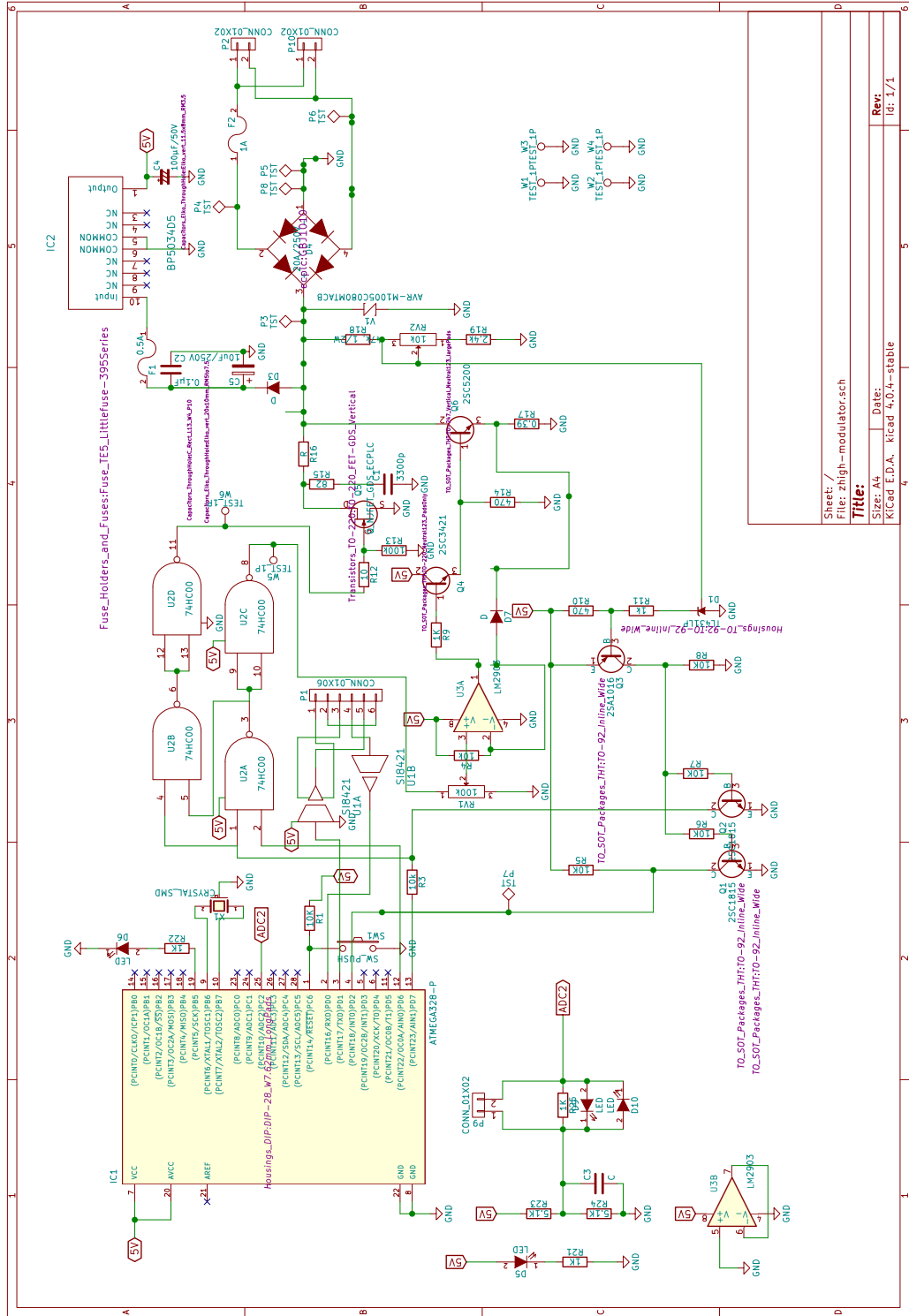
| | | |
|-----------------|--------------------|--|
| IC2 | BP5034D5 | ecplc:bp5034d5 |
| F1 | 0.5A | Fuse Holders and Fuses:Fuse TE5 Littlefuse-395Series |
| C2 | 0.1 μ F | Capacitors ThroughHole:C Rect L13 W4 P10 |
| 10 μ /250V1 | 10uF/250V | Capacitors Elko ThroughHole:Elko vert 20x10mm |
| D3 | D | Diodes SMD:MELF-RM10 Universal Handsoldering |
| R18 | 47k (1/2W) | Resistors ThroughHole:Resistor Horizontal RM10mm |
| R19 | 2.4k | Resistors ThroughHole:Resistor Horizontal RM10mm |
| D1 | TL431LP | Housings TO-92:TO-92 Inline Wide |
| D4 | 20A/250V | ecplc:GBJ1010 |
| R10 | 470 | Resistors ThroughHole:Resistor Horizontal RM10mm |
| R11 | 1k | Resistors ThroughHole:Resistor Horizontal RM10mm |
| Q3 | 2SA1016 | TO SOT Packages THT:TO-92 Inline Wide |
| R8 | 10K | Resistors ThroughHole:Resistor Horizontal RM10mm |
| R7 | 10K | Resistors ThroughHole:Resistor Horizontal RM10mm |
| R6 | 10K | Resistors ThroughHole:Resistor Horizontal RM10mm |
| Q2 | 2SC1815 | TO SOT Packages THT:TO-92 Inline Wide |
| R5 | 10K | Resistors ThroughHole:Resistor Horizontal RM10mm |
| IC1 | ATMEGA328-P | Housings DIP:DIP-28 W7.62mm LongPads |
| V1 | AVR-M1005C080MTACB | Capacitors ThroughHole:C Disc D7.5 P5 |
| U2 | 74HC00 | Housings DIP:DIP-14 W7.62mm |
| X1 | CRYSTAL SMD | Crystals:Crystal HC49-U Vertical 3Pin |
| R13 | 100k | Resistors ThroughHole:Resistor Horizontal RM10mm |
| R12 | 10 | Resistors ThroughHole:Resistor Horizontal RM10mm |
| R9 | 1K | Resistors ThroughHole:Resistor Horizontal RM10mm |
| R3 | 10k | Resistors ThroughHole:Resistor Horizontal RM10mm |
| RV1 | 100k | ecplc:RV2-JP |
| R1 | 10K | Resistors ThroughHole:Resistor Horizontal RM10mm |
| U1 | SI8421 | Housings SOIC:SOIC-8 3.9x4.9mm Pitch1.27mm |
| R15 | 82 | Resistors ThroughHole:Resistor Horizontal RM15mm |
| C1 | 3300p | Capacitors ThroughHole:C Disc D7.5 P5 |

| | | |
|-----|-------------------|--|
| R16 | R | Resistors'ThroughHole:Resistor'Cement'Vertical |
| Q5 | Q'NJFET'GDS'ECPLC | Transistors'TO-220:TO-220'FET-GDS'Vertical |
| P2 | CONN'01X02 | Connect:bornier2 |
| P1 | CONN'01X06 | Connect:PINHEAD1-6 |
| C4 | 100 μ F/50V | Capacitors'Elko'ThroughHole:Elko'vert |
| RV2 | 10k | ecplc:RV2-JP |
| Q6 | 2SC5200 | TO'SOT'Packages'THT:TO-247'Vertical'largePads |
| U3 | LM2903 | Housings'DIP:DIP-8'W7.62mm |
| P4 | TST | Wire'Pads:SolderWirePad'single'1mmDrill |
| P5 | TST | Wire'Pads:SolderWirePad'single'1mmDrill |
| P6 | TST | Wire'Pads:SolderWirePad'single'1mmDrill |
| P3 | TST | Wire'Pads:SolderWirePad'single'1mmDrill |
| P7 | TST | Wire'Pads:SolderWirePad'single'1mmDrill |
| W3 | TEST'1P | Wire'Pads:SolderWirePad'single'0-8mmDrill |
| W4 | TEST'1P | Wire'Pads:SolderWirePad'single'0-8mmDrill |
| W1 | TEST'1P | Wire'Pads:SolderWirePad'single'0-8mmDrill |
| W2 | TEST'1P | Wire'Pads:SolderWirePad'single'0-8mmDrill |
| SW1 | SW'PUSH | Discret:C2V8 |
| D5 | LED | LEDs:LED-5MM |
| R21 | 1K | Resistors'ThroughHole:Resistor'Horizontal'RM10mm |
| R22 | 1K | Resistors'ThroughHole:Resistor'Horizontal'RM10mm |
| D6 | LED | LEDs:LED-5MM |
| Q1 | 2SC1815 | TO'SOT'Packages'THT:TO-92'Inline'Wide |
| D7 | D | Diodes'SMD:MELF-RM10'Universal'Handsoldering |
| W6 | TEST'1P | Wire'Pads:SolderWirePad'single'0-8mmDrill |
| W5 | TEST'1P | Wire'Pads:SolderWirePad'single'0-8mmDrill |
| P8 | TST | Wire'Pads:SolderWirePad'single'1mmDrill |
| R4 | 10k | Resistors'ThroughHole:Resistor'Horizontal'RM10mm |
| R23 | 5.1K | Resistors'ThroughHole:Resistor'Horizontal'RM10mm |
| R24 | 5.1K | Resistors'ThroughHole:Resistor'Horizontal'RM10mm |

102 付録 A プロトタイプ通信機の詳細仕様

| | | |
|-----|------------|--|
| C3 | C | Capacitors`ThroughHole:C`Disc`D3`P2.5 |
| D9 | LED | LEDs:LED-5MM |
| D10 | LED | LEDs:LED-5MM |
| R25 | 1K | Resistors`ThroughHole:Resistor`Horizontal`RM10mm |
| P9 | CONN`01X02 | Connect:bornier2 |

A.3 回路图



付録 B

リーディングプログラムとの関係性

本付録では、筆者が所属した日本学術振興機構の博士課程リーディングプログラム 東京大学 ソーシャル ICT グローバル・クリエイティブリーダー育成プログラム (GCL) での活動と研究活動の関係性と当該プログラムへの貢献について述べる

B.1 各章との関係性

第 3 章, 第 4 章 GCL プログラム委員との議論の中で, 研究科内の研究室および東京大学内の研究室には存在しない独立した新しい共同研究の枠組みを大阪府の住友電気工業株式会社と締結し, 推進することができた. これらの章の研究は共同研究体制に基づき実現された. また GCL WS(ワークショップ) の枠組みで習得した議論手法を適用することで, 効率的かつ効果的な議論を行うことができた. 加えて住友電気工業, 株式会社インターネットイニシアチブ技術研究所 (インターネットに関する山岳連系研究開発コンソーシアムである WIDE プロジェクトへの参加組織) との共同で, 当該技術に関する特許出願を行うことができた.

第 5 章 GCL プログラムによる海外インターンシップで, インド共和国テレンガナ州 ハイデラバードにあるインド工科大学ハイデラバード校で行った研究である. 先進国とは異なる新興国における電力系統の特徴・性質を考慮した新しい技術の考察と解決方法の提案を行うことができた. また, インド工科大学ハイデラバード校とはその後も定期的に遠隔ミーティングを行っており, 大学間連系のみならず, 産学官での国債連系でのさらなる共同研究への発展も期待される.

B.2 プログラム内での活動と貢献

自動運転車グループへの参加 自動運転車を代表とする電気自動車 (あるいは水素自動車) はスマートグリッドにおいて重要な需要制御の役割を担うことが期待される。東大 GCL 内にある自動運転車の研究グループの教育研究活動に参加し議論を行うことで、自動車とスマートグリッドのシステム連系に関する知見を拡充することができた。

インターンシップサポート インド共和国は今後の精力的な経済のみならず教育研究における発展が期待されている。産業界での活動のみならず、学術的研究においても日本よりも進んでいる分野も存在する。インド工科大学などとアカデミックな交流を行うことは重要であるが、過去の実施例が少いことなどが理由により東京大学からの留学等は残念ながら少い状況であった。この問題を解決するために、現地でのインターンシップ経験などを共有する活動を GCL プログラム内で実施してきた。