

高校生のページ

電力のパケット化 —電力と情報の統合を目指して—

工学研究科 電気工学専攻 先端電気システム論講座
持山志宇、引原隆士

はじめに

本研究室では、非線形力学の基礎から工学的応用に関する研究、および電力変換をベースにしたシステム設計・制御の研究に取り組んでいます。これらの研究テーマの中から、本稿では「電力のパケット化」に関する研究の概要と成果の一部について説明します。

電気は最も身近なエネルギーの一つであり、身の回りの様々な機器の動作に用いられています。皆さんがこの記事を読んでいるコンピュータまたはスマートフォンをはじめとする家電製品、電気自動車などの乗り物、最近見かけることも多くなってきたロボットなどがその例です。そんな電気エネルギーの伝送と管理に関する新しい手法として、私達の研究グループでは電力のパケット化とそれにもとづく電力ルーティングを提案し、その研究開発に取り組んでいます。

電力のパケット化

まず、電力パケットの「パケット」とは何でしょうか。この考え方は、インターネットにおける情報のやりとりに用いられる概念のアナロジーとして導入されています。コンピュータやスマートフォンなどの通信では、送りたい情報はパケットと呼ばれる単位に分割され、宛先などの情報とともに送信されます。そして宛先情報などに基づき、パケットを転送するルータとよばれる機器からなるネットワークを介して受信者に届けられます。電力パケット伝送システムでは、同様に、送りたい電力を小分けにして宛先情報のタグとともに送信します。この一単位を電力パケットと呼びます(図1)。電力パケットは電力ルータと呼ばれる機器のネットワークを介して、負荷へと届けられます。電力のパケット化やそのルーティングの具体的な実現方法については、後で詳しく述べます。

さて、電力をパケット化することには、どんな意義があるのでしょうか。皆さんの家のコンセントにも電力を供給している電力系統では、大規模な発電機群と需要家が送配電網で接続され、すべての発電機が同期して動いています。一方、本研究が対象とするのは、大規模な発電所からは切り離された、小容量の分散型電源や蓄電池と負荷(電力を消費する機器)からなるシステムです。このようなシステムの例としては、マイクログリッドなどに加え、航空機や電気自動車などの乗り物や移動型のロボットなど

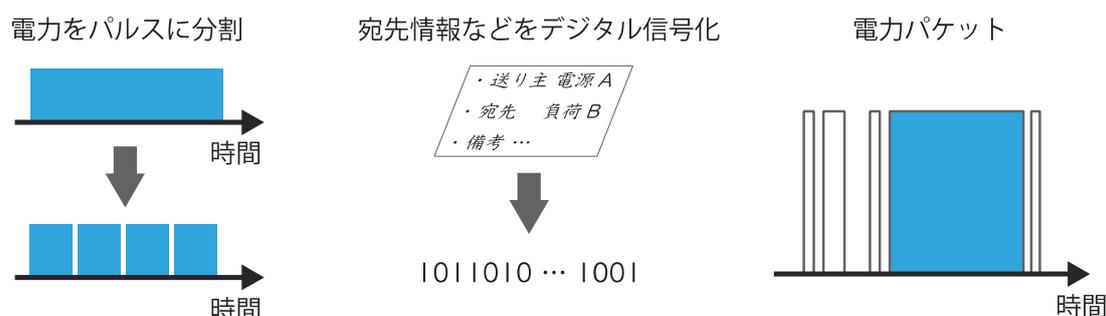


図1：電力のパケット化

が挙げられます。ここで、分散型電源には、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーを含みます。これらの活用は持続可能な社会の実現に向けて重要な課題ですが、その出力は自然環境という制御不可能な要因によって時々刻々と変化するため、電力系統のように同期を前提とするシステムにとっては障害となります。このような状況では、複数の分散型電源から特定の負荷への電力の集中、あるいは複数の負荷への電力の分散を動的に制御するという視点が重要になります。ここに、電力のトレース（流れの追跡）を行いたいという要請が生まれます。電力の packets 化は、これをパルス単位の伝送とタグ付けにより実現します。

ここで、電力のトレースのイメージについて、水の供給に例えて考えてみましょう。従来の電力システムを上水道に例え、水源を電源に対応づけます。この場合、水源が複数あったとしても、浄水場ですべての水が混ざり合います。その上流に例えば A 川と B 川があったとして、それらからやってきた水は蛇口まで来てしまえば区別できません。1 リットルの水に含まれる A 川の水と B 川の水の割合は消費者には分かりません。一方、電力 packets による電力伝送は、ペットボトルの水に対応づけられます。この場合、ラベル（情報タグに対応）を見ながら水源を区別して銘柄を選ぶことができますし、C 水源と D 水源の水を 500 ミリリットルずつ、などと指定することもできます。

ここで重要となるのが、電力とその伝送に関わる情報を仮想的に並列して処理するのではなく、物理層で統合するという点です。これにより、電力 packets を用いた電力マネジメントでは、電力の需給に関する情報と実際の物理量の流れとの乖離を原理的に防ぐことができます。

電力の packets 化を実現するハードウェア

さて、電力の packets 化とそのルーティングの具体的な実現方法に話を移しましょう。電力の packets 化は、半導体デバイスを使った回路スイッチングにより実現されます。半導体スイッチとは、簡単に言うと、回路の導通の有無を電子的に制御できる素子のことです。スイッチを一定時間だけオンにすることで、パルス状の電力波形を生成します。情報タグも同様に、スイッチの「オン」と「オフ」をそれぞれ信号「1」と「0」に対応させることで、電圧波形によるタグ付けを行います。電力の packets 化の実現においては、これらのスイッチングを高速かつ低損失に行うことが欠かせません。近年、炭化ケイ素 (SiC) や窒化ガリウム (GaN) などのワイドバンドギャップ半導体という新たな材料の研究が進んだことで、電力の packets 化が物理層において実現可能になりました。

電力の packets 化とそのルーティングを実現する機器が、電力ルータです (図 2)。これは複数の半導体スイッチからなる電気回路を基本とします。入出力ポートに電力 packets が入力されると、まずはその情報タグを読み取り、それに従って電力 packets を受け取るかどうかを決定します。受け取る場合は、そのポートの入り口にあるスイッチをオンにすることで、電力を一時貯蔵用のストレージに格納します。そして、格納した電力を用いて、次の宛先につながるポートから再び電力 packets を伝送します。この

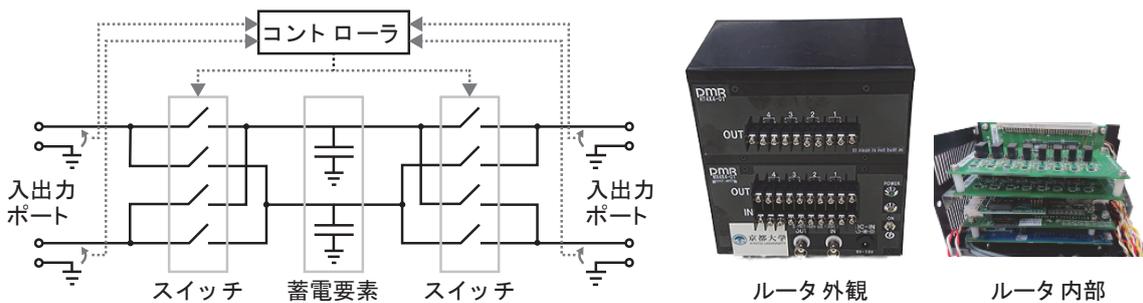


図 2：電力 packets ルータの回路例 (左) と実機写真 (右)

ときのスイッチの動作はすでに述べた通りです。このような貯蓄と転送をルータのネットワーク上で繰り返すことで、電源から負荷への電力供給が行われます。

先ほど、パケット化により電力のトレースが可能になると説明しました。これを実現するために、ルータのネットワーク上で異なる電力パケットは時間的に分離されて伝送されます。このような伝送方式を時分割多重伝送と呼びます。1つのパケットの時間長さを負荷の時定数より十分短く設定することで、時間平均の意味で複数の負荷へ配線を共有した同時供給を行います。パケット化された電力によって、負荷の要求電力を満たすことができることは、すでに理論的に示されています。また、電力パケットの列による断続的な電力供給を用いた具体的な負荷の制御については、後で詳しく述べます。

電力パケット伝送システムをロボットや乗り物など移動型のシステムに適用する場合、ルータネットワークが占める体積や重量の削減は重要な課題となります。私達のグループでは、手作りのプロトタイプから始まり、何世代もの改良を重ねて小型軽量化と扱える電力の大容量化の両立に挑戦してきました(図2右)。将来的には、制御回路も含め全体を集積回路化することで、さらなる小型軽量化が期待されます。

電力のルーティング

電力パケットを送り元から宛先まで伝送する際には、インターネットにおける通信と同様に、複数のルータを経由します。このとき、ルータネットワークの形状によっては、同じ宛先に向かうための複数の経路が存在することがあります(図3)。これらの中から最適なものを選択することは重要な課題となります。同様の問題は情報通信の分野においても存在しますが、電力という物理量を扱う電力パケット伝送システムならではの問題があります。例えば、情報の伝送ではAさんからBさんに情報Cを送るとなると、当然ながらCを細切れにしたパケットはすべてAさんからBさんに送られます。一方、電力パケットでは、電力の受け手がある電力量を要求するとき、必ずしもそのすべてを特定の電源から受け取る必要がない場合があります。すなわち、負荷要求(の総量)を複数の分散型電源に時空間分布として割り当てることとなります。また、その際にどの電源を選択するかを指標として、情報通信に類似的な伝送経路の混雑具合の他に、伝送途中のエネルギー損失が考えられます。私達のグループでは、これら電力パケットに固有の特徴を踏まえた電力ルーティングのアルゴリズムを提案し、状況に応じて適切なルーティングを行えるシステムの実現に成功しています。

電力パケットの密度変調

電力パケットによる電力供給は、断続的なパルス列により与えられると説明しました。これに対して、一般的な負荷は連続的な電力を要求します。この間のギャップを埋める技術が、電力パケットを用いたパルス密度変調です(図4)。従来、供給電力の調整にはパルス幅変調と呼ばれる方法が一般に用いられてきました。これはアナログの信号変調を電力パルスの時間幅に対応付けるもので、アナログ制御に適しています。一方、パルス密度変調では、パルスの幅は一定としてその時間密度を変化させることで供

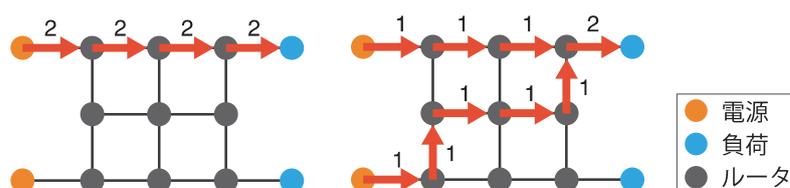


図3：電力パケットルーティングの一例

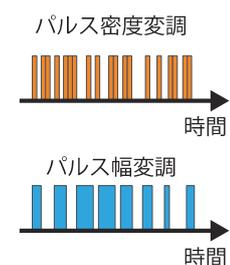


図4：変調方式

給電力の調整を行います。制御信号の大きさおよび時間が量子化されていることから、デジタル制御に適しています。後者はこれまで信号処理の分野では利用されていたものの、電力の分野ではほとんど注目されていませんでした。私達のグループでは、この方式におけるパルス列を電力パケットの列に対応付けることで、負荷の制御が可能であることを示しました。これにより、LEDなどの静的な負荷にとどまらず、ロボットマニピュレータを駆動するモータなど動的な負荷の駆動にも成功しています。

ロボット歩行制御への応用

上記のパルス密度変調は、ある意味で、従来のアナログ的な負荷要求にも電力パケット伝送システムが対応できることを示すものでした。一方で、生物の情報処理システムなどでは、パルスによる情報伝達が行われており、またエネルギーもグルコースを単位として量子化された伝送と貯蓄により取り扱われています。これに倣って、アナログの近似をはさむことなく、情報とエネルギーを一貫してデジタル処理することで、今までにない機能を実現できる可能性があります。

上記の目標に向けた一歩として、現在私達のグループでは歩行ロボットを対象としたパルス給電にもとづく歩行制御について研究を行っています。脚の物理的な構造そのものがもつ特徴から、下り坂においては一定の条件のもと重力によるエネルギーのみで安定した歩行が行えることがわかっています。このことを生かして、傾斜のない水平な地面の上においても、地面をキックする瞬間のみに足首関節や股関節に配したモータにパケットを集中的に印加することで、安定した歩行が実現できることを明らかにしました（図5）。この結果をもとに、運動を司る情報系とその実現に必要なエネルギー伝送系の統合を図るべく、現在研究を進めています。

電力の論理演算

電力がデジタル量として取り扱えるようになると、情報分野におけるデジタル信号処理とのアナロジーを考えることができるようになります。私達のグループでは、電力における論理演算（AND、NANDやORなど）を定義し、物理層において各演算が実現可能であることを示しました（図6左）。ここで、情報と電力の論理演算においては、どちらもデジタル量として取り扱えるという意味で共通点がある一方、重要な違いもあります。そのひとつが、電力は物理量であるということです。例えば、情報を破棄することは比較的容易ですが、電力ではそうはいきません。また、情報では1または0（HIGHまたはLOW）の区別のみが重要となりますが、電力の場合、その存在（HIGH）のみならず、具体的な値の大小が大きな意味を持ちます。電力パケットの伝送過程で生じる散逸やノイズの影響を受けたとき、受け取った論理は同じでも、物理量の総量が異なるという場合が起こりえます。この問題を解決するために、私達は電力の意味での「誤り訂正」の手法を提案しました（図6右）。論理と電力の両方に基づ

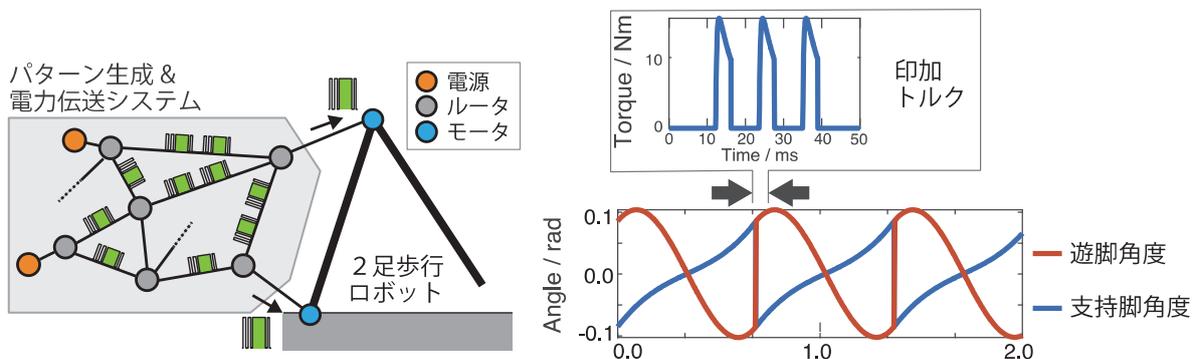


図5：電力パケットを用いたパルス給電による歩行ロボットの制御

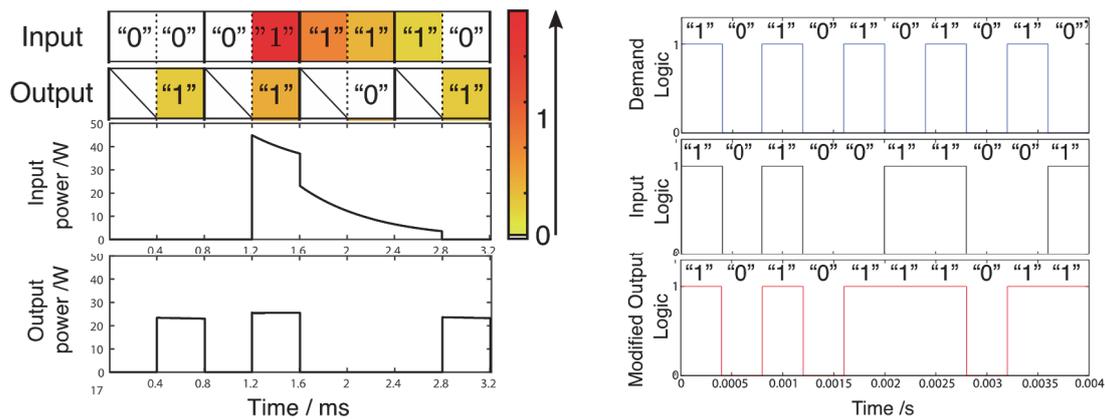


図6：電力の論理演算（左）と誤り訂正（右）

いた制御を行い、受信側でビットを動的に変更することで電力の整合を満たすことに成功しました。

おわりに

本稿では、電力のパケット化という概念とその応用例について説明しました。電力システムをインターネットのように柔軟に取り扱うというアイデアは、提案当初は突飛で非常識なものと受け取られることもありました。今では世界中のグループによって追従され、また類似のアプローチが多数報告されるようになってきました。モノのインターネット（Internet of Things: IoT）やサイバーフィジカルシステムの重要性が叫ばれる世の中において、これは技術の必然の流れと言えます。

電力をパケット化するというアイデアを実際の物理として実現するためには、半導体エレクトロニクス、情報処理・通信、電気電子回路とシステム制御、など幅広い分野の基礎技術が欠かせません。本研究室では、電力のパケット化をはじめとして、このような境界領域にある対象に対して物理や数学の基礎理論に根ざしたアプローチをとることで、全く新しい工学システム機能の創出に挑んでいます。興味を持たれた方は、研究室のホームページなどからその他の研究についてもぜひ調べてみてください。