

電力をパケット化しデジタルに処理する枠組みを構築

—エネルギーと情報の統合に向けたアプローチ—

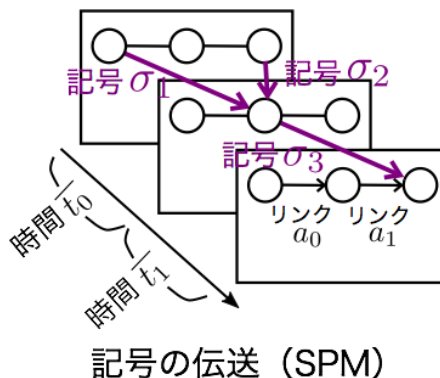
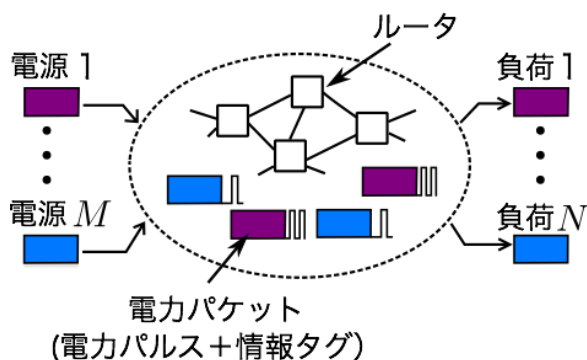
概要

電力パケットは、電力パルスと宛先等を表す情報タグから構成される電力の単位です。これまでに、本プロジェクトにて、電力パケットを物理的に実現する技術や、電力パケットを蓄積・転送する電力ルータの技術を開発しています。今回、京都大学大学院工学研究科 縄田信哉 博士課程学生（現：三菱電機株式会社）、KTH Royal Institute of Technology 牧淳人 准教授、及び京都大学工学研究科 引原隆士 教授は、電力のパケット化技術に基づきデジタル化・量子化された電力を扱う電気エネルギーネットワークの枠組みを構築しました。

シャノンの情報理論は、通信の問題が記号（例えば“0”と“1”）の系列を伝える問題と等価であることを示しています。この枠組みを参考に、電力パケットの記号を、電力パルスと情報タグから成る電力の最小単位として定義しました。そして、電力のパケット化をメッセージとエネルギーの記号系列による同時表現の問題として与えました。この問題設定は、電力を記号の個数により扱うもので、デジタル化・量子化された電力の表現を与えるものです。

今回の研究では、記号として時間的・空間的に伝送される電力の表現として、Symbol Propagation Matrix (SPM) を導入しました。SPM は、デジタル化・量子化された電力を、時空間特徴を表すグラフ上のネットワークフローとして自然に表現します。望ましい需要と供給を記号の個数として実現する問題を SPM の表現により考え、連続世界と離散世界を行き来する離散凸解析の手法を用いることで、厳密解を求めることができる離散最適化問題として定式化しました。本研究の成果は、従来のアナログ回路に基づく電力伝送に対して、異なる技術の可能性を数理的に保証するものです。

本研究は、2018年5月16日に英国の国際学術誌「The Royal Society, Proceedings A」にオンライン掲載されました。



1. 背景

電気エネルギーは、回路理論（キルヒホッフの法則）に基づき連続のフローとして考えられてきました。一方で通信の問題は、シャノンの情報理論によれば記号（例えば“0”と“1”）の系列を伝える問題と等価であり、本質的にデジタルであると言えます。通信ネットワークは、効率良い資源配分を行うために、メッセージを「パケット」と呼ぶ単位に分割して離散的に伝送するパケット交換方式を採用し、発展してきました。もし電気エネルギーを離散的な方法で扱うことができれば、きめ細かな電力の処理が可能となり、電気エネルギーネットワークの大きな変革となります。

電力パケットは、電力パルス（*1）と宛先等を表す情報タグから構成される電力の単位です。電力パケットの概念は、1990年代の電力自由化の議論の中で、複雑な電力フローを管理するための技術として提案されました。しかし、当時の技術では物理的に電力のパケット化を実現することは困難でした。ところで、電力を変換し制御する技術としてパワーエレクトロニクスがあり、半導体素子による電力のスイッチングがこの技術の鍵となっています。特に近年、ワイドバンドギャップ半導体の発展に代表されるようにパワーデバイスの開発が進んでおり、大電力の高速スイッチングが可能となってきています。本プロジェクトでは、このスイッチング技術の発展に基づき、電力のパケット化を実現する物理層の技術を世界に先駆けて開発してきました。開発したシステムでは、情報タグを電圧波形として電力パルスに直接付与することで、物理的に電力のパケット化を実現しています。また、情報タグに基づき電力パケットを蓄積・転送する電力ルータを実現しています。

電力のパケット化技術の応用先として、ロボットや自動車等が考えられます。従来の電力供給系では、十分な容量を持つ電源を導入し、そこに負荷を並列接続する構成が一般的でした。これに対し、電力のパケット化では、分散配置された多数の電源と多数の負荷の間で、きめ細かに電力を処理することを目指します（図 1）。これにより、小さなモータからの回生エネルギーのような、従来は熱として散逸していたエネルギーを、パケット化して有効利用する、究極の省エネルギーの実現が期待されます。

一方で電力のパケット化による電気エネルギーネットワークを設計するためには、物理層の要素技術に加え、システムの設計論が必要となります。本プロジェクトでは、これまでに、シャノンの情報理論を参考に、電力パルスと情報タグから成る電力の最小単位を「記号」とし、電力のパケット化をメッセージとエネルギーの記号系列による同時表現の問題として与えています。この問題設定は、電力を記号の個数により扱うもので、電力がデジタル化・量子化（*2）されている点で従来の回路理論の考え方と本質的に異なります。本研究では、この問題設定に基づき、ネットワークの問題を考えました。

2. 研究手法・成果

本研究では、電力の最小単位を記号として与え、電力のパケット化に基づく電気エネルギーネットワークの枠組みを考えました。ここで電力は、デジタル化・量子化されており、記号として時間的・空間的に伝送されることとなります。このようなエネルギー伝送を表現するための概念として、Symbol Propagation Matrix (SPM) を導入しました。SPM は、デジタル化・量子化された電力を、時空間特徴を表すグラフ上のネットワークフローとして自然に表現します。SPM の枠組みでは、電力の最小単位となると記号が、各時間に各リンクで伝送されます。この様子を図 2 に例示します。

次に、SPM の表現に基づき、望ましい需要と供給を記号の個数として実現する離散最適化問題を考えました。これは各時間に各リンクで送る記号の種類（エネルギーの個数）を最適化する問題であり、一見厳密解を求めるのが困難な問題に思えますが、今回、連続世界と離散世界を行き来する離散凸解析（*3）の手法を用いることで、解ける最適化問題としての定式化に成功しました。定式化した問題では、電源と負荷での供給エネルギー、ルータにおける蓄積エネルギーの変化、及びリンク上のフローに重み付けをして、きめ細かに最適化することが可能です。最後に、最適解が物理的に自然な振る舞いを示すことを具体例を用いて確認し、物理的に自然な形で電力をデジタル化・量子化できることを示しました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究では、電力のパケット化技術に基づき、デジタル化・量子化された電力を扱うネットワークの枠組みを構築しました。特に、連続世界と離散世界を行き来する離散凸解析の手法を用いることで、望ましい需要と供給を記号の個数として実現する離散最適化問題を、厳密解の求まる問題として定式化しました。本研究の成果は、従来のアナログ回路に基づく電力伝送に対して、異なる技術の可能性を数理的に保証するものです。加えて、あらゆるモノがネットワークとして繋がる IoT にも関係した、物理と情報を統合する技術の一つとしての可能性も秘めています。今後の発展として、本研究から、電気電子工学と情報技術の境界領域で、新しい理論や技術分野の生まれることを期待します。

4. 研究プロジェクトについて

本研究の一部は、SIP 次世代パワーエレクトロニクス委託研究(NEDO)およびスーパークラスタープログラム(JST)の支援を受けました。また、著者(S.N.)は、本研究の遂行にあたり京都大学より支援を受けました。

<用語解説>

*1 電力パルス

時間的・空間的なサイズが有限である電氣的な波を意味します。この波自身が持つエネルギーとして、電気エネルギーを送ることができます。

*2 電力の量子化

連続的な値を持つ電力を、最小単位となる記号を与えることで、離散的に扱うことを意味します。

*3 離散凸解析

凸関数は、連続変数の最適化問題において、理論的な核となる概念です。離散凸解析は、「凸関数と類似した離散構造」（連続→離散）という見方から発展した最適化の理論で、「離散構造を兼ね備えた凸関数」（離散→連続）という問題意識も持つ理論です。

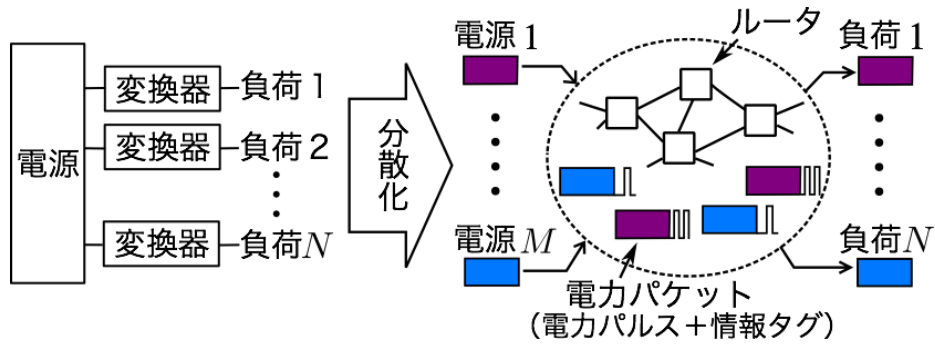


図 1. 電力のパケット化による電気エネルギーネットワーク。従来の電力供給系では、十分な容量を持つ電源を導入し、そこに負荷を並列接続する構成が一般的でした。

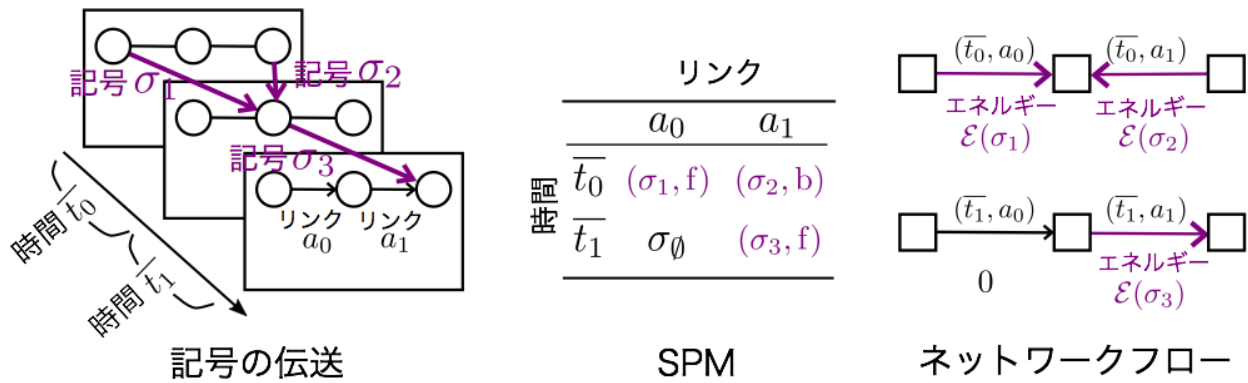


図 2. Symbol Propagation Matrix の枠組み。電力の最小単位となると記号が、各時間に各リンクで伝送されています。

<論文タイトルと著者>

タイトル : Power packet transferability via symbol propagation matrix

著者 : Shinya Nawata, Atsuto Maki and Takashi Hikihara

掲載誌 : The Royal Society, Proceedings A DOI : 10.1098/rspa.2017.0552