

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820144

研究課題名（和文）電力パケット伝送システムのネットワーク化に向けたシステムデザイン

研究課題名（英文）System design for networking of power packet dispatching system

研究代表者

高橋 亮（Takahashi, Ryo）

京都大学・工学研究科・特定助教

研究者番号：00455354

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、近年提案されている電力パケット伝送システムについて、ネットワーク化およびその拡大を考慮したシステムデザインとその実装の検討を行った。特に、システム機器プロトタイプを使用し、ループ構造を持つネットワークの実現可能性やシステムの非同期化、マネージメントしている電力を自己の駆動電力とする機構、および、負荷の所望電力を実現する電力パケット生成アルゴリズムの検討を行った。

研究成果の概要（英文）：In this study, a power packet dispatching system is designed for networking. Using the apparatus of power packet dispatching system, the followings are investigated and experimentally verified: network including loop structure, asynchronous system, energy harvesting for system apparatuses, and, power packet generation algorithm to satisfy the demand of loads.

研究分野：電気電子回路、通信工学、統計物理学

キーワード：電力パケット 電力ルーティング エネルギーマネージメントシステム 送配電システム ネットワーク  
パワーエレクトロニクス

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初より現在に至るまで、電力需要の逼迫やCO2排出量削減の要請などから、太陽光発電や風力発電など様々な分散電源の導入や効率的な電力消費が求められている。ここで多数の分散電源の導入は電力システムの不安定化を招くため、分散電源の電力システムへの接続には電力の需要と供給に合わせた注意深い制御が必要となる。そして、効率的な電力消費を実現するために、電力需要家の要求をリアルタイムで受け、その要求に応じる分のみの電力量を送配電するシステム設計の検討が進められていた。ここで、電力マネージメントを目的とした需要家や負荷の状態に関する情報の集約には高度な情報通信技術(ICT)が求められる。このような高度化されたICTを用いて送配電を制御し消費電力の効率化を行う、いわゆるスマートグリッドの実現に向けた研究が研究開始当初から現在に至るまで精力的に進められている。

一方、これまでアナログで伝送されていた電力をパケット化してデジタル的に電力伝送を行う“電力パケット伝送システム”の検討が進められていた。電力のパケット化の概念は1998年に豊田らによって既に提案がされていたが、当時のパワーエレクトロニクスではパケット化に伴う電力損失が大きい等の問題のためにその実現は困難であった。しかし、近年の高度化されたICTや、これまでのSiパワーデバイスに比べてスイッチングロスやオン抵抗を大幅に抑えることができるSiCやGaNなどのパワーデバイスの出現とともに、そのシステムを現実的に考えることが可能となってきていた。

本研究開始当初の段階で、研究代表者は電力パケット伝送システム等に関する研究開発を進めていた。図1に電力パケットの概念図を、図2に電力パケット伝送システムの概念図を示す。電力パケットは伝送する電力の電圧波形に直接情報タグを付加することによって電力伝送と情報伝送の物理層における統合を実現する。情報タグにはその由来電

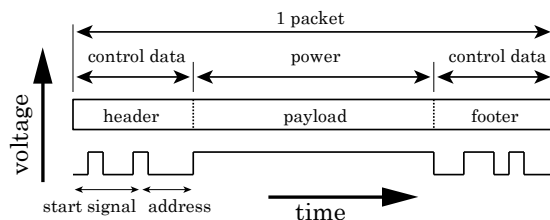


図1 電力パケット概念図

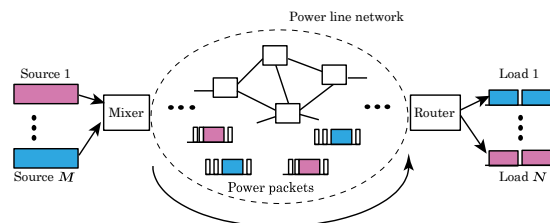


図2 電力パケット伝送システム概念図

源や供給先の負荷の情報などが埋め込まれる。電力パケット伝送システムはミキサとルータからなる。ミキサにはスイッチングデバイスが搭載されており、そのON/OFFによって接続された電源から電力パケットを生成する。一方ルータは電力パケットに付加された情報タグを読み取ることによって目的の負荷に達するルートにパケットを伝送する。この電力パケット伝送システムではパケットを時分割多重的に伝送し、各パケットが運ぶ電力が混ざること防ぐ。これにより、各負荷が要求する電力の質を満たす電源を指定し、その由来電源が保障された電力を受け取ることが可能となる。このような複数候補がある中から電源と負荷の適切なマッチングをとることは、電力の消費量を大きく低減することができる可能性を持つ。また、負荷もしくはルータからミキサへ信号を送ることにより負荷が要求した時のみ必要な量の電力を送るシステムとすることができる

## 2. 研究の目的

これまで、ミキサ・ルータ間にさらにもう一段ルータを入れて構築した小規模なツリー構造のシステムにおいてネットワーク化への検証を行っていた。しかし、これをより大きな規模のネットワークとして構築することを可能とするためには、ネットワーク化に向けたシステム全体のデザインを改めて考える必要がある。本研究では、電力パケッ

ト伝送システムをより大きな規模のネットワークとして構築することを可能とするためのシステムデザインを行う。

### 3. 研究の方法

本研究では、

(1) まず、ループ構造を持つネットワークの構築を試み、図3に示すシステムを構築した。このシステムには複数電源・複数負荷が接続され、特に、電源から負荷3までは2つの経路が用意されている。また、ミキサには2つのルータが並列に接続されており、電力パケットのブロードキャスト伝送の検証が可能なシステムとなっている。ここではミキサによって電力を電力パケット化する際、各電源からのパケットに付与するヘッダ情報を変えることによって経路を選択できるようにした。電源1からの電力パケットはミキサ→ルータA→ルータC→負荷3へ、電源2からの電力パケットはミキサ→ルータB→ルータC→負荷3の経路をたどるように設定した。

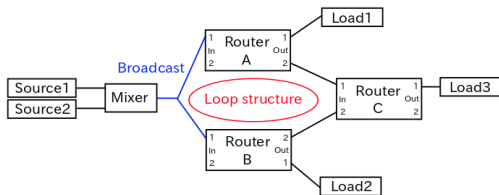


図3 ループ構造を持つ電力パケット伝送システム

(2) ミキサやルータ間の同期は、電力パケットの情報タグを正確に読み込むためには必要不可欠なものである。これまで機器間の同期は、別途クロック信号用の線をつなぐことにより同期の確立を行っており、システム全体で共通のクロックを使用し全体を同期させていた。一方、ネットワークの拡張性を考えた場合、必ずしもシステム全体の共通同期を必要としない非同期システムの方が適していると考えられる。そこで、これまでヘッダ、ペイロード、フッタで構成していた電力パケットの先頭に、さらに同期確立用のプリアンブルを加えた。パケットを受け取るル

ータは、受け取ったパケットのプリアンブルを読み込むことによって、そのパケット固有のクロックに対して同期を確立させることが期待できる。ここではそのためのアルゴリズムを検討し、実際にルータ内コントローラに実装して実験的検証を行った。

(3) システムネットワークの拡大を図る一方で、ネットワーク内の負荷はパケット化された電力によって負荷ごとに異なる所望の電力を受けることが可能でなければならない。そこで、電力パケットのように離散化された電力によって、負荷ごとに異なる所望電力を複数負荷同時に伝送するための電力パケット生成アルゴリズムの検討を行った。

### 4. 研究成果

(1) 本システムによる実験結果を図4に示す。上からミキサの出力電圧、ルータAの出力電圧、ルータBの出力電圧、ルータCの出力電圧が示されている。本図より、ミキサからブロードキャスト伝送された電力パケットが電源ごとにルータAもしくはBを選択的に経由し、ルータCで集約され負荷3に送られていることが示されている。これより、実際にループ構造を持つネットワークが構築でき、システムの頑健性を向上できること、また、電力パケットのブロードキャスト伝送が花王であることが示された。

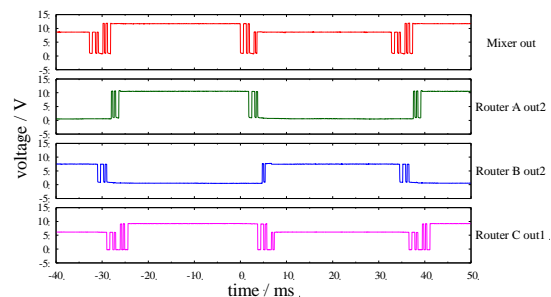


図4 測定された電圧波形

(2) 本実験により、開発したアルゴリズムによって、ルータは受け取ったパケットに対してそのプリアンブルを読み込むことによりクロックを合わせる事が可能であることを実証した。本アルゴリズムを適用するこ

とにより、システム全体で同期を確立せずとも、受け取ったパケットごとにルータが同期を確立できる。これより、ネットワークを拡張していく際、全体での同期確立が不要であり、その拡張性をより高めることができたと言える。

(3) 図5に開発実装したアルゴリズムによって生成された電力パケットの電圧波形を示す。上図(a)に対して下図(b)は負荷の要求電圧が低い場合の電圧波形となっている。これより、電力が多く要求された場合は自動的衣伝送されるパケット数が増加していることが分かる。これより、実際に開発したアルゴリズムをコントローラに実装し、有効であることを実験的に確認できた。また、理論的にその制御アルゴリズムの安定性を示した。本アルゴリズムを用いることによって、電力パケット伝送システムにおいて、従来のシステムと同様に負荷の所望電力を実現することができること、および、本システムでは、使用する電源を選択したうえで、複数負荷を同時に制御することが可能であることが示された。

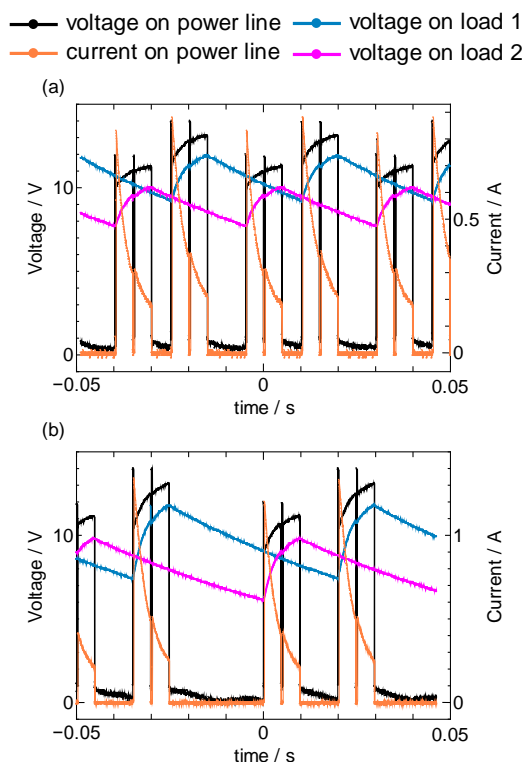


図5 測定された電圧波形

以上の成果から、電力パケット伝送システムをより大規模にネットワーク化していくために必要となる同期や、ネットワーク化されたシステムに接続された複数負荷に対する所望電力伝送が可能であることが示された。また、電力パケット伝送システムでマネージメントされている電力を自己の駆動電力として使用する機構の構築などを行い、システムデザインの完成度を高めた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計13件)

- ① Ryo Takahashi, Shun-ichi Azuma, and Takashi Hikiyara, “Power Regulation with Predictive Dynamic Quantizer in Power Packet Dispatching System”, IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 63, pp. 7653 - 7661, 2016.  
DOI: [10.1109/TIE.2016.2591898](https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2591898)
- ② Yanzi Zhou, Ryo Takahashi, Naoaki Fujii, and Takashi Hikiyara, “Power Packet Dispatching with Second-Order Clock Synchronization”, International Journal of Circuit Theory and Applications, vol. 44, pp 739 - 743, 2016.  
DOI: [10.1002/cta.2103](https://doi.org/10.1002/cta.2103).
- ③ Naoaki Fujii, Ryo Takahashi, and Takashi Hikiyara, “Networked Power Packet Dispatching System for Multi-path Routing”, Proc. 2014 IEEE/SCIE International Symposium on System Integration, pp. 357 - 362, 2014.  
DOI: [10.1109/SII.2014.7028064](https://doi.org/10.1109/SII.2014.7028064)

[学会発表] (計11件)

- ① 吉田直充, 縄田信哉, 高橋亮, 引原隆士, “電力パケット伝送系におけるルータのハーベスティングに関する検討”, 電気学会電子・情報・システム部門大会, 神戸大学, 2016年8月.
- ② 吉田直充, 縄田信哉, 高橋亮, 引原隆士, “電力パケットの伝送におけるルータ駆動のためのエネルギーハーベスティングに関する一検討”, 電子情報通信学会総合大会, 九州大学, 2016年3月.

③ Naoaki Fujii, Ryo Takahashi, and Takashi Hikihara, “Networked Power Packet Dispatching System for Multi-path Routing”, 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Tokyo, Japan, Sept. 2014.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高橋 亮 (Takahashi, Ryo)  
京都大学・大学院工学研究科・特定助教  
研究者番号：00455354