

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：34303

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04071

研究課題名（和文）デジタル電力伝送システムにおける分散電源間協調による適応的集中分散切替給電

研究課題名（英文）Adaptive Centralized and Distributed Switching Power Supply with Coordination among Distributed Power Supplies in Digital Power Delivery Systems

研究代表者

高橋 亮（Takahashi, Ryo）

京都先端科学大学・工学部・准教授

研究者番号：00455354

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究により、電力を離散的に伝送するデジタル電力伝送によってより細かな電力伝送制御の実現が期待できることが示された。また、それより派生した技術により、より柔軟な双方向電力伝送の導入が可能であることや、近年のパワーデバイススイッチングの高速化が進んでいるがその高速化が進むほど従来のパルス幅変調に代えてパルス密度変調による性能向上が期待できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、電気自動車や電動航空機等の閉鎖系においては、限られたエネルギーの効率的運用とともに、フェイルセーフの観点から、複数電源を分散配置することによる電源冗長化の検討が進められている。また、エネルギーの有効活用のためには一時的に電力をため、必要な時に取り出すことのできる蓄電池の活用は不可欠である。本研究成果では、電力マネージメントにおける電力の出し入れを可能とする双方化や、離散パルスとしてデジタル化された電力により細かな電力制御を可能とするパルス密度変調の詳細な検討を進めており、学術的社会的に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：The digital power delivery, which delivers power discretely, is expected to realize finer power transmission control. The technology derived from it can introduce more flexible bidirectional power transmission. High-speed switching can improve performance by pulse density modulation instead of conventional pulse width modulation.

研究分野：電気エネルギーシステム、通信システム

キーワード：電力パケット伝送システム 電力ルーティング パルス密度変調 パワーエレクトロニクス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来の電力伝送システムでは、システムに接続されたすべての負荷に電力が供給される。現在この従来システムに IoT など情報通信技術を用いたエネルギー管理システムによる効率的エネルギー運用が進められている。この検討では、センサによって使用していない負荷を検出し、その負荷と電源間の接続をスイッチによって絶つというものが主である。一方、電力パケット伝送システムでは、単独の負荷電源間の ON/OFF のみならず複数電源複数負荷間において同時に給電電力量を細かく調整できる。さらに伝送する電力に情報が物理的に直接タグ付けされていることにより、負荷を動かす電力と、どのように動かすかという情報を、タイムラグなく伝送することが可能である。このシステムではインターネットによる情報伝送と同じように、電力のストア&フォワードが行われる。すなわち、電力ルータに内包された蓄電要素に一時的に電力をためることにより、電力を時間的および空間的に切り分けて使用することを可能とする。現在、電気自動車や電動航空機等の閉鎖系においては、限られたエネルギーの効率的運用とともに、フェイルセーフの観点から、複数電源を分散配置することによる電源冗長化の検討が進められている。このことから、より細かなエネルギー運用の実現可能性をもつ電力パケットベースのデジタル電力伝送システムにおける分散電源間協調による負荷への給電の研究が求められている。

2. 研究の目的

先に述べた通り、電力パケット伝送システムでは、単独の負荷電源間の ON/OFF のみならず複数電源複数負荷間において同時に給電電力量を細かく調整できる。さらに伝送する電力に情報が物理的に直接タグ付けされていることにより、電力情報をタイムラグなく伝送することが可能である。このシステムでは電力のストア&フォワードが行われるため、電力ルータに内包された蓄電要素に一時的に電力をためることにより、電力を時間的および空間的に切り分けて使用することを可能とする。本研究では、このような電力パケット伝送システムの特徴を利用し、接続された複数電源や、各電力ルータの蓄電要素に分散的に貯められていた電力を、平時にはパケット単位できめ細かい省エネルギー重視の運用を行う一方、一部負荷やエリアが、単一電源では賄えないような大電力が必要となった際に自動的に複数電源を協調させ即座に優先・集中的に供給するシステムの検討を行った。(A)これを実現するためのアルゴリズムのデザインを進め、その実現可能性の検証を進めるとともに、(B)さらに双方向に電力をマネジメントするために適した回路構造の検討、および、交流電力ルータへ応用する発展的な研究も行った。また、(C)本研究で用いた電力パケットのパルス密度変調による負荷制御の技術を先進的インバータに用いることによるモータ制御についても検討を行い、その有用性について数値的実験的に検証を行った。

3. 研究の方法

A: 複数電源複数負荷を含む電力パケット伝送システムにおける負荷への適応的電力供給の方法のひとつとして合意制御に基づいた電力供給の検討が進められている。本研究ではその合意制御をベースにその実装の検討を進め、必要なコントローラ的设计を行った。

B: 一方で、本システムの構築において重要な技術要素の一つであるルータの双方向化について、その発展的な研究として交流電力ルータの双方向化への展開も行った。A: 図 1 に双方向電力ルータ(4ポート)プロトタイプ構成概念図を示す。スイッチ A,B,C,D はそれぞれ SiC パワー MOSFET (650V/22A) 2つを逆直列接続して構成した双方向スイッチである。これらスイッチの ON/OFF を切り替えることにより所望のポート間の接続を確立する。また、各ポートに電圧センサが設置されており、その情報を利用することで、スイッチへのストレスが小さいタイミングで回線切り替えを実行することができる。図 2 にこの双方向電力ルータを用いた電力ルーティング検証実験系の概念図を示す。ポート 1 に 100 V_{rms} 交流安定化電源、ポート 2 に 100 W 交流電

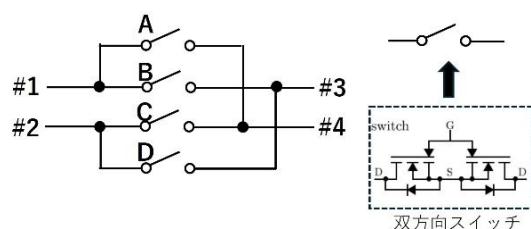


図 1 双方向電力ルータプロトタイプ構成概念図

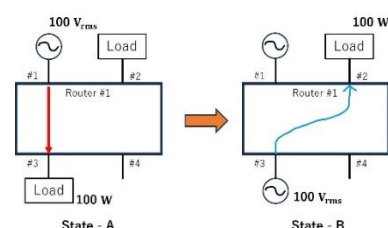


図 2 実験系概念図

子負荷(定電力負荷)を接続した。ポート 3 には、別途同じルータを用いて 100 W 負荷と 100

V_{rms} 電源の瞬時切り替えを可能と模擬蓄電要素を接続した。本検証では、ルータによる回線接続状態として図のように State-A と State-B を考える。State-A ではポート 1 と 3 が接続され、1 の電源から 3 の負荷へ電力が流れる。State-B ではポート 2 と 3 が接続され、2 の電源から 2 の負荷へ電力が流れる。ルータ内スイッチの ON/OFF を変更することにより、この State-A/B 間の切り替えを行った。ポート 3 に着目すると、State-A ではルータは電力を出力し、State-B では電力が入力されている状態となり、双方向ルーティングの検証が可能である。今回、実際に各ポートで測定されたルータによる回線切り替え前後の電流電圧波形を測定した。

C: 電力パケットという離散電力によって負荷を制御する場合、1 パケットの幅を固定するとすれば電力量はパルスの密度によって調整される。これはすなわちパルス密度変調による制御を意味する。パルス密度変調方式はパルスの幅を短くすればするほどその性能が上がるのが期待される。電力パケット伝送システムにおいては、動的量子化器を導入したパルス密度変調による負荷制御を提案しその検証を行っていた。そこで、近年開発された先進的インバータである Y-Inverter に対して動的量子化器を用いたパルス密度変調を用いることによりその有用性についての検討を行った。Y-Inverter は 3 つの Buck-Boost コンバータを組み合わせることによって構成されており、直流電源から 3 相交流を作ることが可能である。今回、インバータ内の各スイッチを動的量子化器によって生成されるパルス列によって ON/OFF 制御し、パルス密度変調による 3 相交流の生成の検証を行った。

4. 研究成果

A: 合意制御に基づいた制御の実装に必要なコントローラボードのスペックを見積もり、適したボードの選定を行い、その実装を進めた。

B: 実験で測定した波形から、双方向交流電力ルータプロトタイプによって、双方向電力の回線切り替えが実現できることを示した。また、各ポートのセンサ情報を利用することによって、切り替え時における双方向スイッチへのストレスが低いタイミングでの回線切り替えを実現できることが確認できた。これらの成果により、電力パケット伝送システムにおいて導入された双方向スイッチと各ポートに設置したセンサ情報で、電力ルーティングシステムにおける蓄電要素の柔軟な配置の実現可能性を示すことができた。

C: 実験結果より、提案したアルゴリズムの実装、および、従来のパルス幅変調とほぼ同様に理想に近い波形で所望の電力の供給が実現できることを確かめた。また、数値シミュレーションにより、パルス幅を短くしパルス生成速度を上げることで、より電圧のリプルを抑え歪みの小さい波形を実現できる可能性を示すことができた (図 3 , 4)

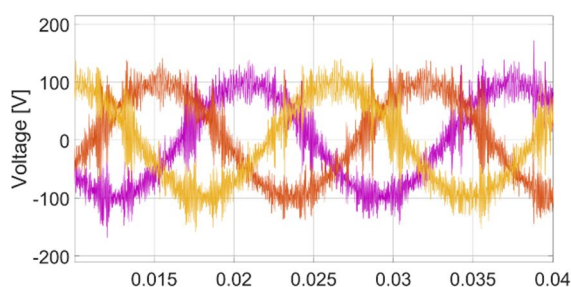


図 3 1 パルス幅を 4 μs で出力したときの電圧波形

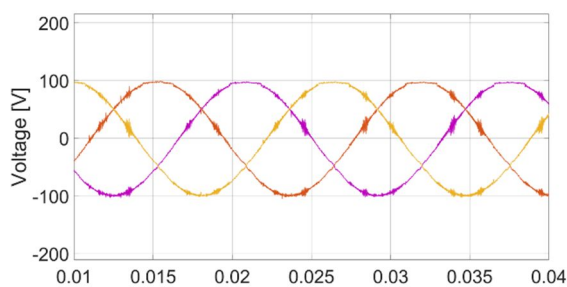


図 4 1 パルス幅を 1 μs で出力したときの電圧波形

これらの研究成果により、電力を離散的に伝送するデジタル電力伝送によってより細かな電力伝送制御の実現が期待できることが示された。また、それより派生した技術により、より柔軟な双方向電力伝送の導入が可能であることや、近年のパワーデバイススイッチングの高速化が進んでいるがその高速化が進むほど従来のパルス幅変調に代えてパルス密度変調による性能向上が期待できることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Prakash Gautam, Yonghwa Lee, Ryo Takahashi, and Alberto Castellazzi	4. 巻 -
2. 論文標題 A Study of Pulse Density Modulation to GaN Y-Inverter	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proc. 10th International Power Electronics and Motion Control Conference	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Prakash Gautam, Yonghwa Lee, Ryo Takahashi, and Alberto Castellazzi
2. 発表標題 A Study of Pulse Density Modulation to GaN Y-Inverter
3. 学会等名 The 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高橋 亮, 持山 志宇, 薄 良彦
2. 発表標題 双方向融通技術を用いたエネルギーシステムの研究(II): 双方向電力ルータの研究開発とその検証
3. 学会等名 2024年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高橋 亮
2. 発表標題 交流電力ルータによる回線交換式電力ルーティングの研究開発
3. 学会等名 令和5年電気関係学会関西支部連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Prakash Gautam and Ryo Takahashi
2. 発表標題 A Study of Boost Converter Using Pulse Density Modulation with Dynamic Quantizer
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------