

京都大学	博士（工 学）	氏名	片山 慎治
論文題目	A Feasible Design of Power Packet Dispatching System (電力パケット伝送システムの実現可能な設計)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、電力パケットを用いた電力伝送システム実現のための設計法を提案したものである。特に、電力パケット伝送システムのハードウェア、機器間伝送、電源負荷間の電力伝送の3点に着目し、実験的検討を基本としてシステムの性能を決定する必須要件について示している。その上で、システムを構成する回路の設計および伝送する電力パケットの構成を与えている。本論文は7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、研究の背景、意義、関連研究の状況を述べている。対象とする直流配電系において、エネルギーマネジメントシステムに求められる要素を述べるとともに、設計における前提条件と具体的な目標をまとめている。</p> <p>第2章では、電力パケット伝送システムの主要なハードウェアであるルータにおいて、電力パケット伝送の性能を制約する要因を検討している。まず、先行研究において実証されたルータにおける電力パケットの生成法を再検討し、同手法が実装において単位電力パケットあたりの情報量と電力量の両立が難しいことを指摘している。この検討を受けて、先の情報量と電力量の両立を可能にするルータを開発し、電力パケットの生成法を提案している。具体的には、電力パケットの情報部と電力部のそれぞれにおいて各々の目的に応じたスイッチ素子を適用し、ルータの出力段階で合成できる構造を提案している。開発したルータを用いて電力パケットの伝送を行い、情報量と電力量の両立が可能であることを明らかにしている。また、単位電力パケットあたりの情報量と電力量の制約は、各々のスイッチによって独立に決定されることを示している。</p> <p>第3章及び第4章では、情報部について検討している。第3章では、システムに対して分散制御を提案し、情報部の短縮を図るとともに、電力伝送システムとしての性能向上を目指して有線双方向通信を実証している。制御として、負荷に応じた電力供給を行う需給バランスを保つものとした。先行研究における集中制御に基づく方法は、システムの規模が大きくなり負荷やルータの数が増えるほどに、情報伝送に必要な時間、負荷変動に応じた電力伝送における遅延時間が課題となる。そこで本論文では、システム全体をいくつかのサブシステムに分割し、各サブシステム内で電力の需給バランスを保つよう電力の要求とそれに対する応答を行う方法を提案している。要求の伝送に無線を用いた設定では、分散動作は達成できるがフィードバックによる遅延が問題となり、同時性の担保に課題が生じた。そこで、有線双方向通信によるフィードバックを行い、遅延時間の短縮が可能であることを確認している。以上より、先行研究が残した課題を解消すると共に、電力伝送システムとして性能を向上させた。</p> <p>第4章では、単一配線上での多方向電力パケット伝送について検討し、伝送に必要な情報量を求めている。まず実験的裏付けとして電力パケットの半二重伝送を実証している。電力の半二重伝送に際しては、電源間のショートを回避する必要がある。この課題に対して、情報通信に用いられるMACプロトコルを導入している。導入したプロトコルでは、</p>			

京都大学	博士 (工 学)	氏名	片山 慎治
<p>電力パケットの情報部については衝突を許し、情報の衝突を検知することで電力部の衝突を回避する方法を提案している。実機を用いた半二重伝送の検証では、複数の実験設定において提案手法が有効であることを示している。多方向伝送は、システムにおいて電力パケットが経由するルータの台数削減に貢献し、電力伝送効率を改善すると期待される。一方で、多方向伝送では各電力パケットの区別に必要な情報量が増加する。そこで、この情報量について複数のプロトコルを対象に評価している。さらに、情報量の増加は電力伝送に利用できる時間の減少をまねくため、シミュレーションによって伝送電力量を評価している。その結果、各接続において、電力パケットの区別すべき種類と採用するプロトコルによって伝送に必要な情報量が定まり、適切なプロトコルの選択を行えば、伝送電力量を維持できることを明らかにした。</p> <p>第5章及び第6章は電源一負荷間で伝送される電力量について検討している。第5章ではシステムの出力に影響を与える電力部のパルス幅と電力パケットの伝送条件について実験とシミュレーションに基づいて検討している。まず、最も簡単なルータの1対1接続からなる構成から検討を進めている。この検討では、1対1接続回路とバックコンバータとの出力特性の類似性が見出される。これを受けて、ルータ3台のカスケード接続を検討している。このシステムには2つの接続構成があり、それぞれの電力伝送のタイミングが出力に影響する。そこで、伝送周期を固定し、パルス幅とタイミングを変更することで出力の平均電圧を求めている。その結果、実験とシミュレーション結果は特徴点が良いな合致を示し、出力が2つの接続で同時に電力を伝送する時間幅とパルス幅に依存することが示された。回路パラメータについてシミュレーションで検討を行い、隣接接続において同時に電力パケットを伝送しない設定では、電力伝送時の応答が不足減衰に分類できるようなキャパシタをストレージに適用した場合には、一定の電力量を短時間で伝送できる可能性を示した。</p> <p>第6章では、第5章で注目した、隣接接続で同時に電力を伝送せず不足減衰の応答条件において電力伝送の解析を行っている。不足減衰では電流波形が振動し、周期的にゼロとなる。この特性を利用し、その半周期を電力伝送の時間幅に採用することで伝送終了時のサージを抑制できることを明らかにしている。このサージ抑制の可能性について実機で検証した。その際に、ストレージ電圧の変動に着目することで、ストレージ電圧がその上限値と下限値から解析できることを明らかにしている。さらに、カスケード接続のネットワーク構成では、上記条件において電力伝送を行う場合、上限値、下限値の間に線形関係が導かれる。この関係を利用したストレージ電圧の推定法を示し、その妥当性を回路シミュレーションとの比較により明らかにしている。ここに提案した手法は精度的に優れており、数値的最適化等と組み合わせることで、ネットワーク設計を容易にする手段となることを示した。</p> <p>第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、本研究の将来展望を述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、電力パケットを応用する技術として、電力パケット伝送システムの設計法の構築を目指したものであり、電力パケット伝送システムのハードウェア、機器間伝送、電源負荷間の電力伝送の3点に着目して、実験的検討を基本としてシステムの性能を決定する必須要件をまとめたものである。本論文により得られた主な結果は以下の通り要約される。

(1) 電力パケット伝送システムの主要なハードウェアである電力パケットルータ(ルータ)に関して、電力パケット生成手法の改善方法を提案すると共にその回路実装を行い、提案手法および回路の動作を実証した。この結果に基づき、1パケット当たりの伝送情報量と電力量はルータのスイッチ特性が支配するが、それらを各目的に合わせて独立に設計できることを示した。

(2) システムの分散制御手法を提案し、実機においてその動作を実証した。また、分散制御によるルータ間での電力パケット伝送において、同一配線による電力パケットの双方向伝送を実現した。これにより、システム内の任意の2点間において電力パケット伝送に必要な基礎技術を確立した。双方向伝送における伝送制御に検討を加え、同一配線上で区別すべき電力パケットの種類と制御に用いるプロトコルから、伝送に必要な情報量を示した。

(3) 電源-負荷間の伝送について検討し、各ルータが電力パケットを伝送するタイミングが出力に与える影響を明らかにした。また、システムとコンバータとの類似性に着目し、電力パケットのパルス幅と伝送タイミングが出力に与える影響を評価した。

(4) 電力パケット伝送システムを分散制御における制御単位に分割し、伝送を各制御単位で独立に行い、不足減衰応答の条件を設定することにより、システムの内部電圧が推定できる手法を提案した。同提案手法と(1)-(3)の結果より、システムの設計法に数値的最適化が導入できる可能性を示した。

上記の結果は、電力のデジタル化を目指した電力パケット伝送システムの設計方法を明らかにしたもので、従来、伝送システムの最適設計において理想化されて扱われてきた電力パケットルータ等に要求される特性を、回路設計にまで落とし込み、実現可能なシステム設計方法を示したものである。課題提案、設定、検討および成果は極めて独創的であって、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年12月13日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

要旨公開可能日： 令和5年 3月 22日以降