

令和 2 年 5 月 18 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06434

研究課題名(和文)パルス化配電ネットワークの基盤技術と運用方式

研究課題名(英文)Fundamentals and operation technology of pulsed power network

研究代表者

杉山 久佳(Sugiyama, Hisayoshi)

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20264799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：パルス化配電ネットワークは、電力を従来の連続波ではなく離散的な電力パルスによって送電する方式である。各パルスは、ネットワーク内で同期されたフレーム上の所定の電力スロットを用いて送電する。本方式は分散型電源との親和性があり、かつ自律分散的なネットワーク運用による高い信頼性を持つ。同ネットワークは提出者自身の発明であり、本研究ではさらに同方式の基盤技術として双方向電力パルス中継を可能にする電力ルータの設計、送電線周囲の電波雑音を低減する電力パルス波形の検討、およびポテンシャル勾配法による運用方式の提案とミニチュアモデルによるその運用状況の検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の地震や台風災害にともなって発生した大規模停電などにより、これらの災害に対する電力システムの信頼性が社会的な問題となっている。本研究が扱ったパルス化配電ネットワークは、分散型電源との親和性に加えて、分散制御による高い信頼性に大きな特長がある。本研究の成果である双方向電力ルータの設計とポテンシャル勾配法によるネットワーク運用方式によれば、パルス化配電ネットワークがさらに発展した適応クラスタ型配電ネットワークの実現が可能となる。クラスタ化された同システムは、分散型電源の特長を生かした広範囲の電力網を高い信頼性をともなって運用することができる。

研究成果の概要(英文)：In the pulsed power network, electric energy is conveyed by distributed pulses located on successive synchronized frames. This method has affinity with distributed generations. In addition, because of distributed control with autonomous node operations, high system reliability is obtained. In this work, as the fundamental technologies, omnidirectional power router and optimal pulse shape for radio noise alleviation are designed. In addition, potential gradient method for power network operation is investigated.

研究分野：通信ネットワーク

キーワード：スマートグリッド インターネットオブエナジー スマートエネルギー パルス化配電ネットワーク  
分散型電源

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

パルス化配電ネットワークは、文献[1]などによって提案された電力パケット伝送の派生方式である。電力パケット伝送は、蓄積交換に基づくデータパケット伝送方式を電力送電に用いることを基本とするので、分散型電源との親和性などを期待することはできるが、電力ルータにおける中継損失の発生、およびネットワーク輻輳時の電力パケット廃棄の可能性が無視できない。これに対してパルス化配電ネットワークは、同期フレームと電力スロットを用いた送電経路予約、および電力ルータにおける直接中継を基盤とするので、中継損失などの無い高効率の配電システムの実現が可能となる。さらに、電力ルータの構成が単純なのでハードウェアの信頼性と低コスト性も得られる。電力ルータの作成が容易であることは、国際会議 IEEE GCCE2015 において展示したデモシステムによって示した[2]。デモシステムは同会議で **Outstanding Demo! Award** を受賞し、日経エレクトロニクス誌でも紹介された[3]。

[1] 井上他, "パケット電力取引に基づく革新的配電システムの提案," 電気学会論文誌B, Vol.131, No.2, 2011.

[2] N. Nampei, T. Onishi, H. Sugiyama, "Simultaneous Power Transmissions Among Specified Sources and Consumers Through Shared Power Lines," IEEE GCCE2015, Osaka, Japan, 2015 (**Outstanding Demo! Award**).

[3] 野澤哲生, "電力の送配電技術に革命," 日経エレクトロニクス, 日経 BP 社, Nov. 2015.

### 2. 研究の目的

本研究は、以上に述べたパルス化配電ネットワークの基盤技術と運用方式の検討により、将来の同ネットワーク実現に向けた基礎研究を行う。

パルス化配電ネットワークの基盤技術と運用方式の検討において以下 3 点の目的を設定する。

#### (1) ネットワーク送電容量を高める分散制御方式：

パルス化配電ネットワークの送電容量は、電力ルータの特性を効果的に利用することによって高めることができる。この利用法は (i) 電力パルス流双方向キャンセルおよび (ii) 電力パルス流多重中継である。いずれも同期フレーム内電力スロット数に対してより多くの送電経路設定を可能とする。これらによる送電容量増大を各ノードの自律制御によって実現する分散アルゴリズムを明らかにする。

#### (2) 分散型電源による近距離送電を主体とする配電網の運用方式：

パルス化配電ネットワークは分散型電源の普及を促進する効果がある。この理由は (i) 既存の電力網では分散型電源からの売電が困難となる場合があるが、パルス化配電ネットワークではこの売電に際して他の電力伝送との干渉が原理的に発生しないので期待する売電利益を確実に得ることができること、さらに (ii) 分散型電源から生じた余剰電力はネットワーク内の集約蓄電池にユーザ情報と共に蓄積することができるので、併設蓄電池が不要となって分散型電源設置コストが大幅に低減することである。これらの利点を効果的に用いた、分散型電源に基づく近距離送電を主体とする配電網の具体的な運用方式を検討する。

#### (3) 非常時における選択的給電など受電者個々の需要を満たす送電プロトコル：

情報ネットワークにおける通信手順は送信者の発呼を起点とするのに対して、パルス化配電ネットワークでは一般ユーザの受電要求を起点とする。加えて、複数送電者からの同時給電などを考慮した特有のプロトコルが必要となる。さらに非常時には、選択的給電の対象となる重要施設情報にアクセスするなどの付随的な処理が発生する。これらのネットワーク運用を分散処理によって実現する、パルス化配電ネットワークに適した送電プロトコルを設計する。

### 3. 研究の方法

研究においては、提案した方式をまずシミュレーションによって検証し、さらに実証用のシステムを製作して、ネットワーク稼働時における提案方式の有効性と信頼性を検証した。また、パルス化配電ネットワーク稼働時に問題となる可能性がある電波ノイズの問題については、理論計算による電磁界解析を基礎として、従来の単一正弦波による送電方式との比較を定量的に行った。これらの成果は、適宜に論文誌と国際会議において発表した。特に国際会議ではパルス化配電ネットワークの実証用ミニチュアシステム(図5)を展示し、これにより優秀展示賞を受賞した[4]。

### 4. 研究成果

報告者自身が提案した新たな電力分配システム「パルス化配電ネットワーク」の基盤技術と運用方式について検討を行い、以下の成果を得た。

(1) 電力パルスの双方向中継を可能とする双方向電力ルータの設計を行い、その動作を確認した。電力ルータは PowerMOSFET などの方向性を持つ電力デバイスを用いて構成するが、複数の外部端子対ごとに一对のデバイスが背面接続する構成により、すべての端子対の双方向中継が可能となった(図1)。同電力ルータによる双方向中継の例を図2に示す。図では、端子AからEへの電力パルス中継を、それぞれの端子に接続した電力デバイスのゲートをオンとすることにより実行する様子を示す。逆に、端子EからAへの中継も同じ電力デバイスのゲートをオンとすることにより可能となる。

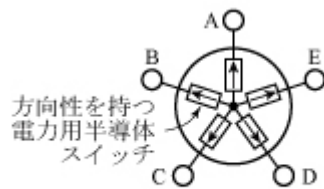


図1 電力ルータ構成法

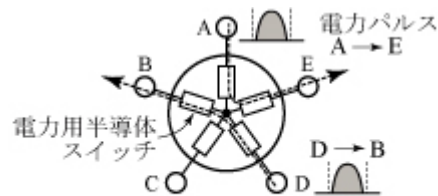


図2 双方向電力パルス中継

- (2) パルス化配電ネットワーク内の各送電者が他の受電者の電力需要と送電距離に基づいて適切に送電先を決定する方式「ポテンシャル勾配法」を提案し、同方式にもとづくネットワークの動作をシミュレーションによって確認した。同方式によればネットワーク内の各ノードが常に最小限の計算負荷により自律分散的に動作するので、ネットワーク拡張性が得られる。図3に、同方式において各送電者が他受電者のポテンシャル勾配に基づいて送電者を決定する例を示す。図において電力ルータEは受電者C、Dのポテンシャル勾配を計算し、この結果より電力ルータFが受電者B、CよりBを選択し、これより送電者Aが次同期フレームより受電者Bへの新たな電力パルスを送信する。図4は、これらの情報処理に関わるPGテーブルの例である。

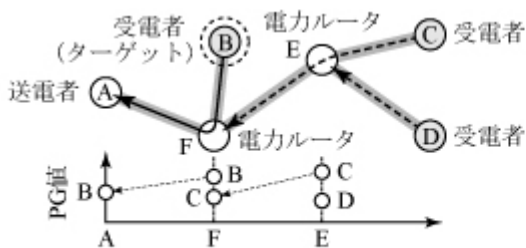


図3 送電者Aによるターゲットの分散的決定

	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)	(vi)
送電者または電力ルータAのPGテーブル	C	6.4	220	29.1	A → B → C	X O O X O X
受電者DのPGテーブル	D	2.8	0	-	D	O O O X O X

図4 PGテーブルの構成

- (3) 以上の成果の実証を目的としたパルス化配電ネットワークのミニチュアモデルを作成した。同モデルは8基の双方向電力ルータ、2基の送電者、および4基の受電者からなる。図5に、作成したミニチュアモデル本体を示す。同モデルはLinuxによる制御コンピュータとUSBケーブルで接続され、コンピュータディスプレイ上のGUIによって制御する。制御内容は各送電者の送電容量、各受電者の電力需要、および送電パルス幅などである。送電パルス幅ごとに、ネットワーク上のすべての送電経路およびすべてのノードが持つPGテーブルをディスプレイに表示する。ネットワークはポテンシャル勾配法に基づいて稼働する。同モデルにより、実際に電力パルスを用いたネットワーク運用がポテンシャル勾配法によって可能であること、およびその稼働状況が妥当なものであることを実証した。同ミニチュアモデルは、2018年の国際会議(IEEE GCCE2018, Nara, Japan)において優秀展示賞を受賞した[4]。

[4] H. Sugiyama, "Scalable Smart Grid with Pulsed Power Distribution Based on Potential Gradient," IEEE GCCE2018, Nara, Japan, 2018 (Excellent Demo Award 2nd Prize).

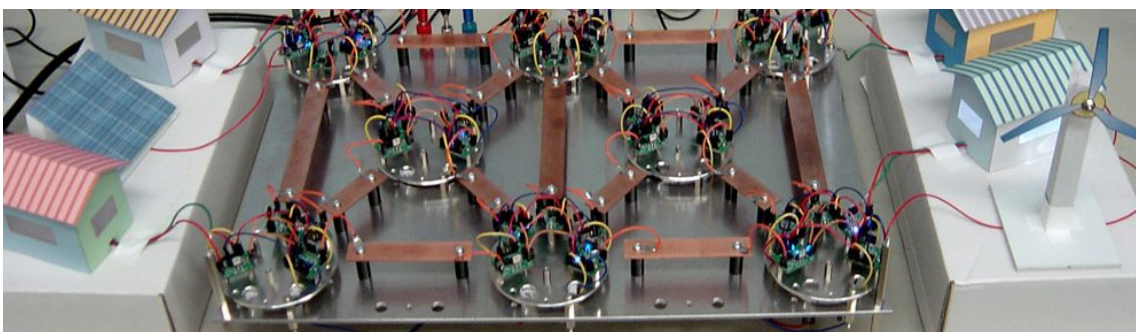


図5 パルス化配電ネットワークミニチュアモデル

- (4) ポテンシャル勾配法に基づくパルス化配電ネットワークが複数の分散型電源を均等に含む場合は、広域のネットワークが各分散型電源を中心として自律的にクラスタ化し、この結果災害などに対する高い信頼性を得ることが期待できる。この高信頼型ネットワークを「適応

クラスタ型配電ネットワーク」と呼び、その稼働状況をシミュレーションによって検証した。図6に、適応クラスタ型配電ネットワークにおける各クラスタの自律的变化の様子を示す。図では、隣接するクラスタ A, B, C が示される。各クラスタはそれぞれ送電者  $A_s, B_s, C_s$  を含み、他のノードは受電者である。矢印は送電路を示す。クラスタ C 内では、G と H が  $C_s$  より電力供給を受ける。他方、F は送電者  $B_s$  と  $C_s$  の中間にあるので、両送電者から同時に受電する。このときクラスタ B と C の外周は重なり合う。図では  $A_s$  に障害が発生し、この結果クラスタ A が消失した場合を示す。このとき、電力供給を絶たれた D の電力需要が増大し、この結果  $B_s$  が D への給電を開始する。これに伴い、クラスタ B の外周が図のように変化して D を内包する。

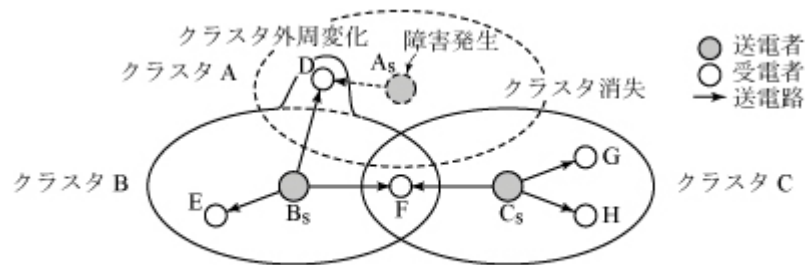


図6 適応型クラスタによる自律的ネットワーク分割

- (5) パルス化された電力伝送においては各パルス波形が持つ高周波成分が周囲の電波環境に影響する可能性がある。この問題について解析し、パルス波形を適切に設定することによりこの問題が低減することを確認した。従来の連続した正弦波形による送電方式では、送電線周囲の電磁界への影響は低周波の限定的な干渉に止まる。これに対して離散的なパルス波形による送電の場合は、高周波の電磁波が発生して周囲の電波環境に大きく干渉する可能性がある。この問題に対して、パルス化送電ともなう電波雑音強度の評価を行った。まず種々の形状のパルス波形を想定し、その同期フレーム内の配置を連続的または離散的とし、これらの組み合わせに対して直線状の送電線周囲に発生する電界強度スペクトルを解析した。この解析の結果、パルス化送電により発生する電波雑音は、その総量は従来の送電方式の場合を上回るが、スペクトルのピーク値については、どの波形とフレーム内配置の組み合わせに対しても連続正弦波形の場合と同程度であることを確認した。また、特に標準電波が使用する LF 帯においては、正弦波 1 周期を模した波形の場合に、国内電波法が定める微弱電波の電界強度規定を満足する結果が得られた。以上の成果を論文 [5] にまとめて公表した。さらに実際のアンテナ測定を想定した解析を行い同様な結論を得て申請者自身の国際会議 Organized Session において発表した [6]。

[5] H. Sugiyama, "Influence of Pulsed Power Transmission on Radio Wave Environment," Journal of Physical Science and Application, vol. 8, no. 2, pp. 1-10, 2018.

[6] H. Sugiyama, "Evaluation of Actual Radio Noise of Pulsed Power Transmission Detected by Antenna," IEEE ICCE-TW, Yilan, Taiwan, May 2019 (Invited).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hisayoshi Sugiyama	4. 巻 8
2. 論文標題 Influence of Pulsed Power Transmission on Radio Wave Environment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physical Science and Application	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.17265/2159-5348/2018.02.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 杉山久佳	4. 巻 J101-B
2. 論文標題 分散型電源を基盤とする局所的パルス化配電ネットワークの運用 方式	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 B	6. 最初と最後の頁 463-474
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14923/transcomj.2017JBP3044	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11件（うち招待講演 3件/うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Hisayoshi Sugiyama
2. 発表標題 Evaluation of Actual Radio Noise of Pulsed Power Transmission Detected by Antenna
3. 学会等名 IEEE ICCE-TW 2019（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hisayoshi Sugiyama
2. 発表標題 Parallel and Distributed Operation of Smart Grid with Pulsed Power Transmission
3. 学会等名 IEEE CSE 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hisayoshi Sugiyama
2. 発表標題 Soft Clustering of Large Scale Power Grid with Pulsed Power Distribution
3. 学会等名 IEEE GCCE 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hisayoshi Sugiyama
2. 発表標題 Influence of Pulsed Power Transmission on Radio Wave Environment in Low Frequency Range
3. 学会等名 IEEE ICCE-TW (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hisayoshi Sugiyama
2. 発表標題 Pulsed Power Network with Scalable Operating Procedure Based on Potential Gradient
3. 学会等名 IEEE MWSCAS (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hisayoshi Sugiyama
2. 発表標題 Scalable Smart Grid with Pulsed Power Distribution Based on Potential Gradient
3. 学会等名 IEEE GCCE (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hisayoshi Sugiyama
2. 発表標題 Power Transmission Procedure with Elemental Path Generations and Releases in Localized Pulsed Power Network
3. 学会等名 IEEE GCCE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hisayoshi Sugiyama
2. 発表標題 Influence of Packetized Electric Power Transmission on Radio Wave Environment
3. 学会等名 IEEE ICCE-TW (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hisayoshi Sugiyama
2. 発表標題 Localized Pulsed Power Network for Distributed Generations and Consumers
3. 学会等名 EMN Europe Meeting on Smart Grid Technology (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hisayoshi Sugiyama
2. 発表標題 Pulsed Power Network with Inherent Operating Procedure and Multiple Relaying of Power Routers
3. 学会等名 IEEE GCCE (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hisayoshi Sugiyama
2. 発表標題 Power Transmission Procedure for Localized Pulsed Power Network with Distributed Generations and Consumers
3. 学会等名 IEEE GCCE (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 受電装置決定システム, 受電装置決定方法および受電装置決定装置	発明者 杉山久佳	権利者 大阪市立大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-142720	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 デジタル電カルレーティングデバイス、制御装置、デジタル電カルレーティングデバイスの制御方法、及びデジタル電カルレーティングシステム	発明者 杉山久佳	権利者 公立大学法人大阪市立大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願 2017-121314	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------------------------	-----------------------	----