

令和元年6月4日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(B) (特設分野研究)

研究期間：2016～2018

課題番号：16KT0104

研究課題名(和文)再帰的構造により創発的シンセシス機能をもつグリッドシステムの研究

研究課題名(英文) Research on novel grid system with emergent synthesis function induced by recursive structure

研究代表者

門 勇一 (Kado, Yuichi)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授

研究者番号：90500223

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：電力ネットワークに創発的シンセシス機能を導入することを目的に研究を推進した。具体的には3ポート電力ルータを開発し、この電力ルータに3ポート間の非干渉・リアルタイム電力フロー制御機能を実装した。この電力ルータをアクティブノードとしてDC電力ネットワークを構築し、以下の成果を得た。異電圧ポート間の非干渉電力フロー制御法確立、3ポート電力ルータのスタンドアロン動作時の伝達関数モデル開発、3ポート電力ルータの相互接続時の伝達関数モデル開発、ネットワークシステムのスマート・スタートアップ方式開発、相互接続された電力ルータで構成した自律分散型ネットワークシステム全体の伝達関数モデル開発。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力ネットワークに関わる社会的課題には、地球温暖化防止に向けた自然再生エネルギー源の大量導入や災害に強い地産地消型の電力融通があり、今後は普及する電気自動車とグリッドとの統合や交流/直流変換損失の無い直流グリッド構築等がある。本研究では、3ポートの絶縁型電力ルータをアクティブノードとして様々なトポロジーの直流電力ネットワークを構成する方法を提案し、相互接続された3ポート絶縁型電力ルータの安定な制御理論、高速電力フロー制御方法、及び、ネットワーク全体のスマートスタートアップ方式を提案し、実験でその妥当性を検証した。これらの成果は、上記の課題に応える直流マイクログリッド構築実現に大きく貢献する。

研究成果の概要(英文)： The purpose of our research is implementing an emergent synthesis function in electric power networks. A three-port power router with real-time decoupling power flow control function was developed. Then, a DC power network was constructed by using the power routers as active nodes.

We developed and clarified the following points. (1) Transfer function of stand-alone power router, (2) Transfer function of mutually-connected power routers, (3) Transfer function of an autonomous distributed power network consisting of power routers (4) Smart start-up method of the autonomous distributed power network, (5) Decoupling power flow control of power router with different voltage ports.

研究分野：3ポート電力ルータを用いた直流マイクログリッド

キーワード：3ポート絶縁型DC/DC変換器 電力ルータ 自律分散型直流マイクログリッド 伝達関数 非干渉電力フロー制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災を契機に、電力ネットワークなどの社会インフラシステムを強靱化する必要性が強く認識された。しかしながら、従前の細分化された学問体系で展開されてきた電力工学の範疇では、被災によりシステムの機能・性能が大きく損なわれ、外部環境が激しく変化する中で、システムの平時の目的を再定義して再生・復興するシステムを実現することは困難であった。特に、災害時にシステムの内外でダイナミックな変化が起き、システムに要求される機能・仕様が大きく変化する中で、従来は「想定外」とされた状況下でも、システムが限りなく正常に近いレベルで動作しながら再構築できる頑健性と柔軟性を兼備するシステムの実現が課題であった。

2. 研究の目的

本研究では、上記課題解決のためレジリエンス、安全・信頼性、システム制御、通信・ネットワーク、電力工学等の工学分野を横断的に取り込み、それらを融合して、新たな電力ネットワーク・システム制御理論を構築する。特に、システムの目的、制御アルゴリズム、相互接続トポロジーをも適応的・動的に再構成可能なスーパー・レジリエントなシステム実現の基礎となる制御理論を明らかにする。

3. 研究の方法

検討対象システムの基本要素となるのが3ポートDC電力ルータ(3ポート絶縁型DC/DC電力変換器)であり、3ポート間で電力フローの向きと大きさを任意に可変制御する機能を有する。この特徴を活かして多様な電源、負荷、蓄電要素を有する家庭、マンション等を3ポート電力ルータで相互接続した自律的マイクログリッドセルを構成する。この自律的セルを基本単位とした再帰的構造をもつ広域・大規模グリッドシステムへの展開、相互接続の自由度とダイナミズムの許容、及び多様なトポロジーでの相互接続を実現するために必要となる、以下の課題に取り組む。異電圧ポート間の非干渉電力フロー制御法確立、3ポート電力ルータのスタンダアロン動作時の伝達関数モデル開発、3ポート電力ルータの相互接続時の伝達関数モデルの開発、ネットワークシステムのスマート・スタートアップ方式開発、相互接続された電力ルータより構成される自律分散型ネットワークシステム全体の伝達関数モデル開発。

4. 研究成果

(1) 3ポート電力ルータとDCマイクログリッド

3ポートDC電力ルータの構成を図1に示す。3ユニットで構成されており、コアユニットの3ポート絶縁型DC/DC変換器(Triple-Active-Bridge TABコンバータとも呼ばれる)、そのポートに接続する脱着可能なAC/DC変換器ユニット、及びそれらを制御する制御ユニットより構成される。コアユニットの3ポート絶縁型DC/DC変換器はDABを構成するパワー素子のゲート駆動信号の位相を制御することにより、3ポート間のDC電力フローの向きと大きさを制御する。そのポートにAC/DC変換器ユニットを接続すると、そのポートはAC電力を扱うことが出来る。従って、3ポート電力ルータには図2で示したバリエーションがあり、ニーズに応じて選択する。制御ユニットはどのバリエーションに対してもプログラムの変更で対応可能な機能をもつ。3ポートDC電力ルータで構成した2レベルDCマイクログリッドの構成例を図3に示す。

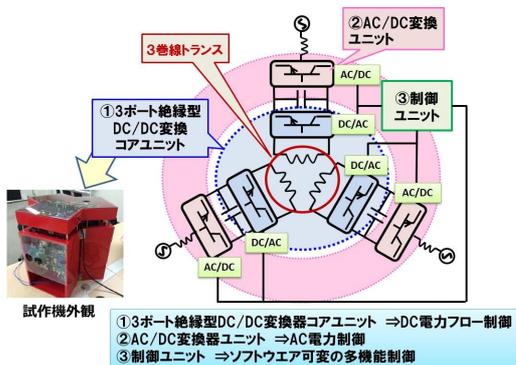


図1 3ポート電力ルータの構成

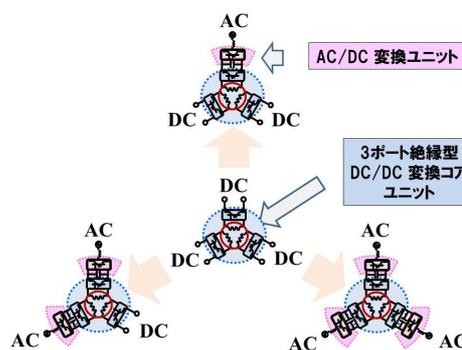


図2 3ポート電力ルータのバリエーション

(2) 3ポート電力ルータの非干渉電力フロー制御(ポート間の電圧が異なる場合)

3ポート絶縁型DC/DC変換器の回路構成を図4に示す。変換器は3巻線変圧器、3つの外付けインダクタ(L_{e1} L_{e2} L_{e3})及び、3つのDABセルより構成される。ポート1のDABセルを構成するパワー素子のゲート駆動信号(Duty比が50%の矩形波信号)に対するポート2のゲート駆動信号の位相差を θ_2 、ポート3のゲート駆動信号の位相差 θ_3 とする。これらのポート間の位相差を制御することにより、各ポート間の電力フローの向きと大きさを制御する^[16]。

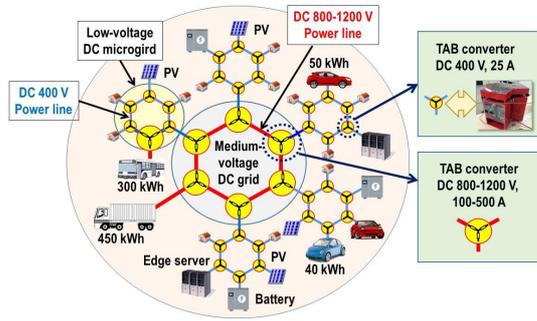


図3 2レベルマイクログリッドの構成例

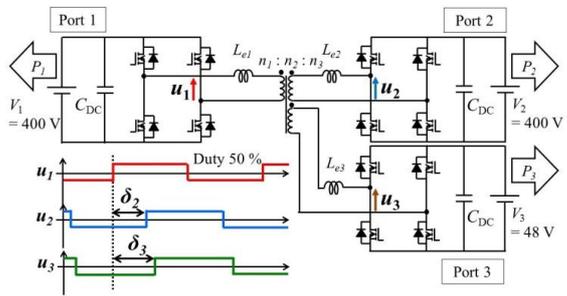


図4 3ポート電力ルータの回路図と位相制御

電力ネットワークへの応用の観点からは、外付けインダクタ値 (L_e) のバラツキや、電力ルータ内での電力損失、その他外乱の影響を受けず、正確に伝送電力を制御するためには3ポート電力ルータのフィードバック制御系が必要になる。更に、あるポートの制御操作量(位相差)が他のポートの伝送電力量に影響を与えない様に、各ポートの伝送電力量を独立に制御する必要がある。

この要求に応える電流及び電圧フィードバックによる非干渉制御システムを開発した^{[5],[13]}。その制御ブロックを図5に示す。電圧 V_2 のフィードバックループと電流 I_3 のフィードバックループからなる。電圧一定制御の制御器には、比例積分制御を採用し、電流一定制御の制御器には、積分制御を採用した。各制御器からの出力 r_2 および r_3 は行列 H によって干渉を起こさないような δ_2 と δ_3 に演算しなおされ、TAB コンバータに入力される。この制御方式のプログラムを開発して、試作したプロトタイプの3ポート絶縁型DC/DC変換器に実装して電力フロー制御実験を行った(図6)。3ポート絶縁型DC/DC変換器の試作機と諸元を表1に示す。電力フロー制御実験波形を図7に示す。

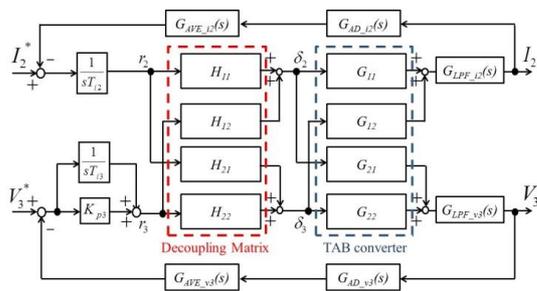


図5 非干渉制御ブロック図

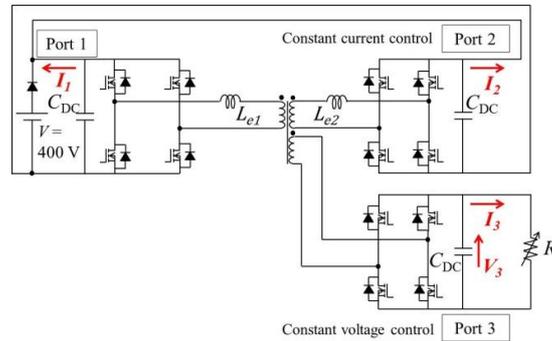


図6 電力フロー制御実験回路

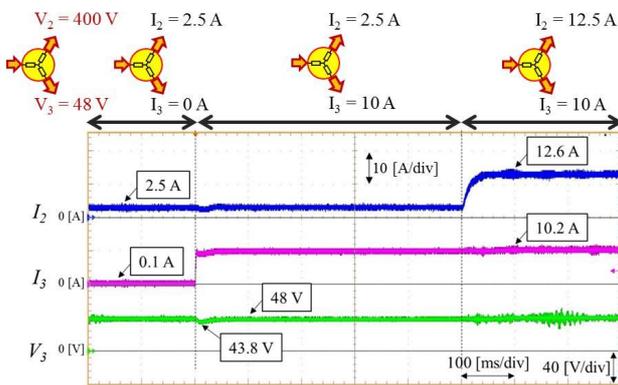


図7 電力フロー制御実験波形

Specification	Symbols	Values
Switching frequency[kHz]	f_{sw}	20
DC capacitor[mF]	C_{DC}	9.4
Transformer core material		FINEMET
Turn ratio of transformer	$n_1:n_2:n_3$	25:25:9
Leakage inductance of transformer [μ H]	$L_{trans1}, L_{trans2}, L_{trans3}$	3.38, 4.65, 1.45
Parasitic resistance of transformer [$m\Omega$]	$R_{trans1}, R_{trans2}, R_{trans3}$	123.6, 128.7, 11.7
External inductances [μ H]	L_{e1}, L_{e2}	36.8, 37.6
Parasitic resistance of inductor [$m\Omega$]	R_{ind1}, R_{ind2}	52.3, 54.4

表1 試作機の主要諸元

最初に、制御指令値を $I_2^* = 2.5 \text{ A}$ 、 $I_3^* = 0 \text{ A}$ から $I_2^* = 2.5 \text{ A}$ 、 $I_3^* = 10.0 \text{ A}$ にステップ変化させた時の、電流の応答を示している。概ね設定時定数で安定に制御指令値に変化することが確認できる。一方、 I_3 が大きく変化しても、 I_2 は変化せず、ポート間の非干渉制御が実現されている。次のステップで制御指令値を $I_2^* = 2.5 \text{ A}$ 、 $I_3^* = 10.0 \text{ A}$ から $I_2^* = 12.5 \text{ A}$ 、 $I_3^* = 2.5 \text{ A}$ にステップ変化させた時の電流の応答とポート3の電圧変化を示している。この

ケースでは、ポート 2 の電流のみ変化させて、ポート 3 の電流を変えない非干渉制御を確認する実験になっている。実験結果はポート 3 の電流は変化せず、ポート 3 の電圧も変化していない。以上から、提案した非干渉制御方式は妥当であることが確認できる。

(3) 相互接続された 3 ポート電力ルータの制御

接続された 3 ポート電力ルータの回路図を図 8 に示す^[4]。また、接続点の伝達関数を図 9 に示す。接続点における出力電流の変化は接続点の電圧に影響を与えるので、相互接続された 3 ポート電力ルータは相互に影響を与え合う。また、接続点には定電圧源が接続されていないので、接続点に定電圧制御をかけないと、接続点の電圧を一定に維持することが出来ない。そこで、接続点の電圧を一定に維持しながら、相互接続された 3 ポート電力ルータ間での電力フロー制御システムを構築した。制御ブロック図を図 10 に示す。制御システムは 1 つの電圧フィードバック制御ループと 3 つの電流フィードバック制御ループよりなる。各制御ループには 16 点移動平均処理機能の伝達関数と A/D 変換器の遅延が挿入されている。

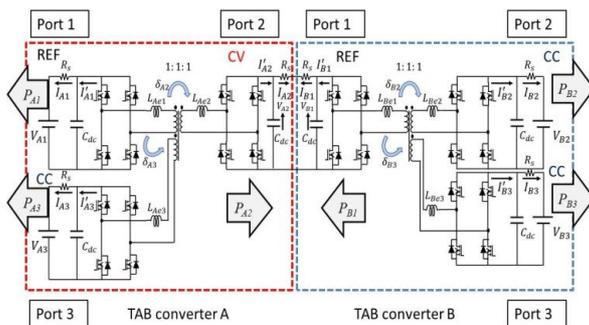


図 8 接続された 3 ポート電力ルータ

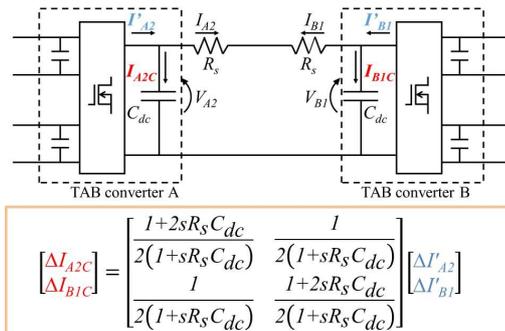


図 9 接続部の伝達関数

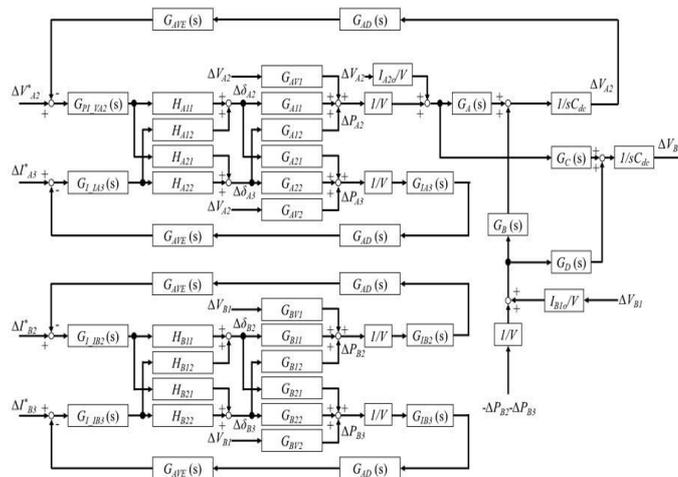


図 10 相互接続された 3 ポート電力ルータの電力フロー制御システムのブロック図

開発した電力フロー制御システムの妥当性を評価するため、図 11 に示す実験回路で電力フローのステップ変化を起こした時の、接続点の定電圧制御性を評価した。各種指令値の内、ルータ B の電流指令値 $I_{2,B}^*$ および $I_{3,B}^*$ のみステップ変化させた。ルータ B の電流指令値は初め、 $I_{2,B}^* = 2 \text{ A}$ 、 $I_{3,B}^* = 2 \text{ A}$ としておき、定常状態になった後、電流指令値を $I_{2,B}^* = 6 \text{ A}$ 、 $I_{3,B}^* = 6 \text{ A}$ にステップ変化ステップ変化させた。図 12 はその際ルータ A の 1 次側を流れる電 I_1 、ルータ B の 2 次側、3 次側を流れる電 I_2 、 I_3 および、連結端の電圧 V_4 の時間変化を測定した結果時間変化を測定した結果である。ルータ B の 2 次側、3 次側に流れる電値はそれぞれ $I_2 = 6.1 \text{ A}$ 、 $I_3 = 6.0 \text{ A}$ となり指令値に一致していることが確認できる。ルータ A の 1 次側に流れる電流はルータ A の 3 次側、ルータ B の 2 次側、3 次側に流れる電の合計となる。ルータ A の 1 次側に流れる電は $I_1 = 15.3 \text{ A}$ であり、各電流指令値の和 15 A に一致している。連結端電圧について、ルータ B の電流指令値がステップ変化した際にルータ B に連結端から引き抜かれる電力が増えるので連結端電圧 V_4 が 378 V まで下がる、ルータ A の電圧一定制御によって 400 V に引き戻されており、図 12 から連結端の電圧が大幅に落ちることなく一定に保たれていることが確認できる。以上よりルータ内の電流値が急激に変化した際、言い換えるとポート間の電力フローが急激に変化した際も、連結端の電圧は一定制御により保たれている。

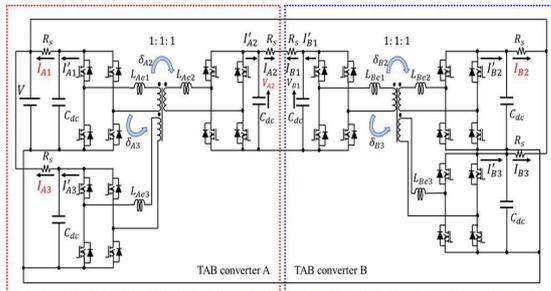


図 11 接続された 3 ポート電力ルータの実験回路

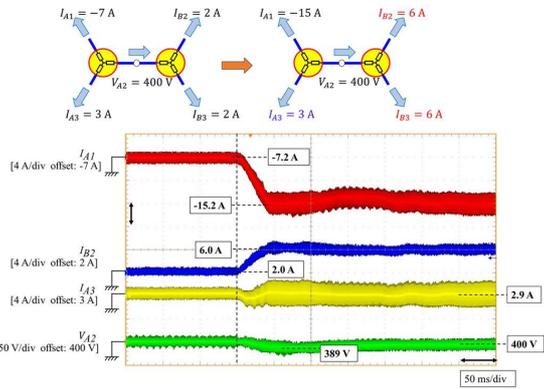


図 12 実験波形

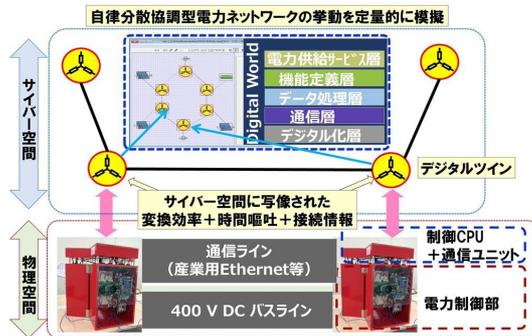


図 13 電力ネットワーク制御方式の開発

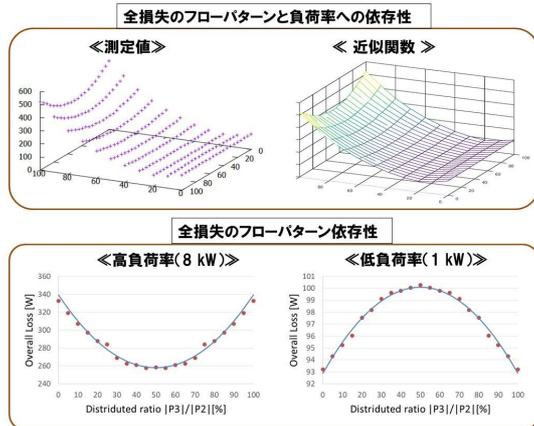


図 14 全損失特性のモデル化

(4) ネットワークノードへの展開

スタンドアロン及び相互接続された 3 ポート電力ルータの制御手法を確立したので、この電力ルータをアクティブノードとして用いて、自律分散型電力ネットワークへ応用展開する研究開発を進めた^{[2][7]}。今後、電気自動車の普及に備えた充電システム機能、IoT と AI の社会で遍在するエッジサーバへの電力供給システム機能、系統連係機能、動作中ネットワークへの Plug in & play 機能、被災時にミッション再定義できる高リジリエンス化機能を有した電力ネットワークが期待される。電力ネットワークの制御プログラムを開発するため、ネットワークのノード機能を担う 3 ポート電力ルータはサイバー空間でデジタルツインとして定量的にモデル化する必要がある(図 13)。例えば、ルータの電力変換効率の電力フローパターンと負荷率の依存性、時間応答等の特性がモデルに反映される。その結果 3 ポート電力ルータで相互接続された電源、蓄電要素、及び負荷よりなるネットワーク全体の電力供給能力、時間応答、安定性等の挙動、更に開発した連携制御プログラムの安定性等を高精度にシミュレーションする事が出来る。モデル化の例として、3 ポート電力ルータの全損失のモデル化例を図 14 に示す。全損失は電力フローパターンと負荷率に依存性がある。この依存性を最小二乗法で関数近似した結果を図中に示している。実験値と比較した時、想定される負荷率の範囲で誤差率は 4.4 % 以下であった。3 ポート電力ルータの伝達関数の開発により時間応答特性をモデル化しており、この全損失のモデルとの組み合わせにより電力ネットワーク制御方式の確立を実現する予定である。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

[1] Koya Nishimoto, Yuichi Kado, Keiji Wada, "Implementation of decoupling power flow control system in triple active bridge converter rated at 400 V, 10 kW, and 20 kHz" IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.7, No.5, p. 410-415, 2018

[2] Yue Yu, Keisuke Masumoto, Keiji Wada, Yuichi Kado, "A DC power distribution system In a data center using a triple active bridge DC-DC converter," Vol.7, No.3, p. 202-209, 2018

[学会発表](計 16 件)

[1] Pin-Yu Huang, Takahiro Ohta, Makoto Fujii, Yuichi Kado "Bidirectional Isolated Ripple Cancel Dual Active Bridge DC-DC Converter," Proc. of the 3rd IEEE ICDCM 2019.

[2] Yuichi Kado, Shota Okutani, Keigo Katagiri, Pin-Yu Huang, "Autonomous DC Microgrid Consisting of Triple Active Bridge Converters," Proc. of the 3rd IEEE ICDCM 2019.

[3] Shota Okutani, Akira Nishi, Pin-Yu Huang, Yuichi Kado, "Polar Coordinate Decoupling Power

Flow Control for Triple Active Bridge Converter,” Proc. of the 3rd IEEE ICDCM 2019.

[4] Shota Okutani, Yuichi Kado, Pin-Yu Huang, and Junichi Arai, “Stability Analysis of Control System Based on Linearized Model of Mutually Connected TAB Converters,” Proc. of IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC 2018).

[5] Keigo Katagiri, Koya Nishimoto, Shota Nakagawa, Shota Okutani, Yuichi Kado, Keiji Wada, “Decoupling power flow control of triple-active bridge converter with voltage difference between each port for distributed power supply system,” Proc. of the 20th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2018 ECCE Europe

[6] Kento Kurosawa, Koya Nishimoto, Keigo Katagiri, Junichi Arai, Pin-Yu Huang, and Yuichi Kado, “Smart Self-charging Method Implemented in a Triple-Active-Bridge Converter,” Proc. of the 20th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2018 ECCE Europe

[7] Yuichi Kado, Keigo Katagiri, “Autonomous Distributed Power Network Consisting of Triple Active Bridge Converters,” Proc. of Energy and Sustainability in Small Developing Economies, ES2DE 2018

[8] Yue Yu, Keiji Wada, Yuichi Kado, “Power Flow Control of DC Power Distribution Systems using Triple Active Bridge Converter in a Data Center,” Proc. of the 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2018

[9] Keigo Katagiri, Shota Nakagawa, Yuichi Kado, Keiji Wada, “Analysis on load-factor dependence of triple active bridge converter’s transmission efficiency for autonomous power,” Proc. of TENCON 2017

[10] Keigo Katagiri, Shota Nakagawa, Kento Kurosawa, Junichi Arai, Yuichi Kado, Keiji Wada, “Power flow control of triple active bridge converter equipped with AC/DC converter for constructing,” Proc. of IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society

[11] Yue Yu, Keisuke Masumoto, Keiji Wada, Yuichi Kado, “Power flow control of a triple active bridge DC-DC converter using GaN power devices for a low-voltage DC power distribution system,” Proc. of 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia

[12] Shota Nakagawa, Junichi Arai, Ryosuke Kasashima, Koya Nishimoto, Yuichi Kado, Keiji Wada, “Dynamic performance of triple-active bridge converter rated at 400 V, 10 kW, and 20 kHz,” Proc. of the 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia, IFEEC

[13] Koya Nishimoto, Yuichi Kado, Ryosuke Kasashima, Shota Nakagawa, Keiji Wada, “Decoupling power flow control system in triple active bridge converter rated at 400 V, 10 kW, and 20 kHz,” Proc. of the IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems

[14] Ryosuke Kasashima, Shota Nakagawa, Koya Nishimoto, Yuichi Kado, “Implementation and power-loss characteristics of 400-V, 10-kW, 20-kHz three-way isolated DC/DC converter as a power routing unit for constructing microgrid systems,” Proc. of the IEEE TENCON2016

[15] Ryosuke Kasashima, Shota Nakagawa, Koya Nishimoto, Yuichi Kado, Keiji Wada, “Power loss analysis of 10kW three-way isolated DC/DC converter using SiC-MOSFETs as a power routing,” Proc. of the 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2016)

[16] Yuichi Kado, Ryosuke Kasashima, Naoki Iwama, Keiji Wada, “Implementation and performance of three-way isolated DC/DC converter using SiC-MOSFETs for power flow control,” Proc. of the IEEE 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG2016)

【その他】

ホームページ等

【大学公式 YouTube チャンネル】

https://www.youtube.com/playlist?list=PLpnS2kRiz92Rn9WSMfQ7t_aw0tG0tKJfT

【夢ナビ URL】

<http://yumenavi.info/lecture.aspx?GNKCD=g008280>

【日刊工業新聞】

<https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00446808>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：岩月 勝美

ローマ字氏名：Iwatuski Katsumi

所属研究機関名：東北大学・

部局名：電気通信研究機構

職名：特任教授

研究者番号（8桁）：00590522

研究分担者氏名：山田 博仁

ローマ字氏名：Yamada Hirohito

所属研究機関名：東北大学・

部局名：工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：60443991