

# 高効率な直流配電システムの構築を可能にする DC/DC コンバータ

DC/DC Converters That Enable the Building of DC Electricity Distribution Systems

依田 和之 YODA, Kazuyuki

田重田 稔久 TAJUTA, Toshihisa

山田 隆二 YAMADA, Ryuji

再生可能エネルギーによる電力を直流で配電する際に、電力平準化に用いる蓄電池の充放電を行う、200 kW の双方向絶縁 DC/DC コンバータを開発した。電池の電圧変動 400 ～ 800 V に対応できる回路方式としてデュアルアクティブブリッジを採用し、SiC-MOSFET モジュールを用いてスイッチング周波数を 16 kHz としたことにより、絶縁トランスを商用周波数用のものに比べて、体積は 11% に、質量は 7% に小型・軽量化した。変換効率、定格条件で 98% に達する高効率を得た。これを 1 台のユニットとして直並列接続することにより、さらに大容量化が可能である。

Fuji Electric has developed a 200-kW bi-directional isolated DC/DC converter. The equipment charges and discharges storage batteries for electrical power leveling when DC power from renewable energy is distributed. Adopting a dual active bridge circuit system that can handle battery voltage fluctuations between 400 to 800 V and using SiC-MOSFET modules to set the switching frequency to as high as 16 kHz have reduced the volume of the isolation transformer to 11% and the mass to 7%. The conversion efficiency reaches 98%. Serial-parallel connection of the units can increase the capacity.

## ① まえがき

カーボンニュートラルの実現に向けて、動力源を従来の内燃機関から蓄電池に替えた電気自動車や電気推進船、あるいは CO<sub>2</sub> を排出しない燃料電池を動力源とする燃料電池自動車や燃料電池船、燃料電池建設機械の実用化検討が進んでいる。さらに、エネルギー供給における再生可能エネルギー（再エネ）の導入が加速している。太陽光発電に代表される再エネは天候によって発電電力が変動するものがあるため、これを平準化する手段として蓄電池を併設するシステムが増えている。また、非化石燃料として注目されている水素を燃料にした燃料電池は、急峻（きゅうしゅん）な負荷変動に対応できないので、これに対応するために蓄電池を併設する必要がある。さらに、再エネ由来の電力を使って水素を生成する水電解システムも検討されている。

これらの機器は、入出力する電力が直流なので、図 1 に示す再エネの直流配電システムのように直流母線を介して相互接続すると、簡素で高効率なシステムを構成することができる。この際、蓄電池や燃料電池などは電圧が変動するため、一定電圧の直流母線との電圧整合のために直流電力変換器（DC/DC コンバータ）が必要となる。

富士電機ではこれらの用途に適した大容量の双方向絶縁 DC/DC コンバータを開発した。本稿では、高効率な直流配電システムの構築を可能にする DC/DC コンバータについて述べる。

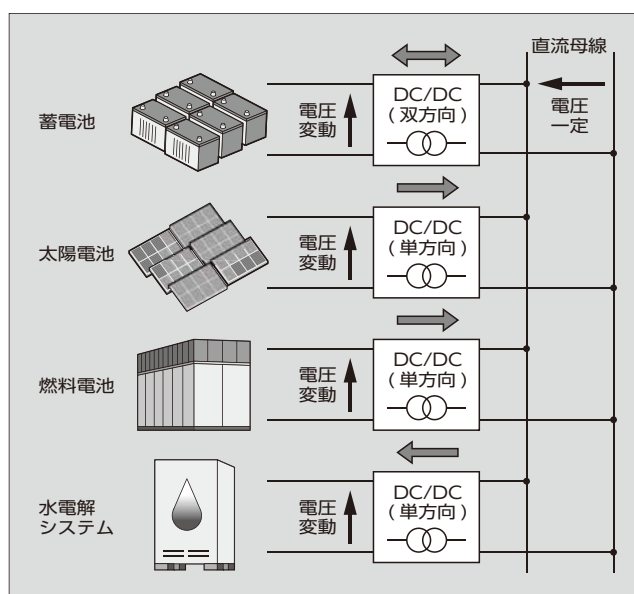


図 1 再エネの直流配電システム

## ② 直流配電システム用 DC/DC コンバータの課題

直流配電システムでは直流母線の電圧を一定に保つ必要がある。太陽電池や蓄電池などからの出力電圧の変動を母線電圧に整合させることが DC/DC コンバータに求められる基本機能である。さらに、地絡などから電池を保護し、あるいは漏えい電流による電池の損傷を防ぐために母線と蓄電池などとの絶縁機能が求められる。

これまでの絶縁型 DC/DC コンバータの多くが単方向に電力が流れる用途に使われていたが、蓄電池に適用する場合は充放電動作を可能にするために双方向の変換機能が必要である。こうした用途では 100 kW から MW クラスに

達するものが求められる。さらに言うまでもなく、エネルギーの有効利用のために高効率であることも必須条件である。

用途に応じてさまざまな電圧・電流仕様の直流配電システムを容易に実現できることも重要である。

### ③ 双方向絶縁 DC/DC コンバータの回路方式

直流電力変換においても、入出力間を電氣的に絶縁する場合には一旦交流に変換し、トランスを介することにより絶縁する。さらに双方向の電力変換が可能な回路は、トランスを挟んで一次側と二次側が対称に構成されることが原則となる。また、トランスを小型化するため、10 kHz 以上の高周波交流を用いるのが通例である。これらの要件を満たした上で大容量化に適した回路方式として、図 2 に示す対称形の双方向 LLC 共振コンバータと、図 3 に示すデュアルアクティブブリッジ (DAB : Dual Active Bridge) が知られている。

さらに、一次側の許容電圧範囲は接続する電源の出力電圧の変動範囲を十分カバーしなければならない。例えば、リチウムイオン電池の出力電圧は、満充電状態と放電末期で約 1.5 倍の差があり、これを一定の電圧に変換できる性能が求められる。

LLC 共振コンバータは、共振回路の伝達特性が周波数によって変化する特性を利用して出力を制御する。図 4 に LLC 共振回路の電流波形を示す。高周波交流部 ( $i_1$  または  $i_2$ ) のうち、電力伝送側に当たる側の電流波形は、双

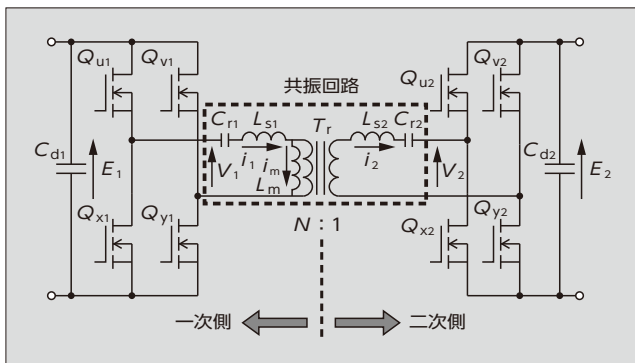


図 2 双方向 LLC 共振コンバータの回路方式

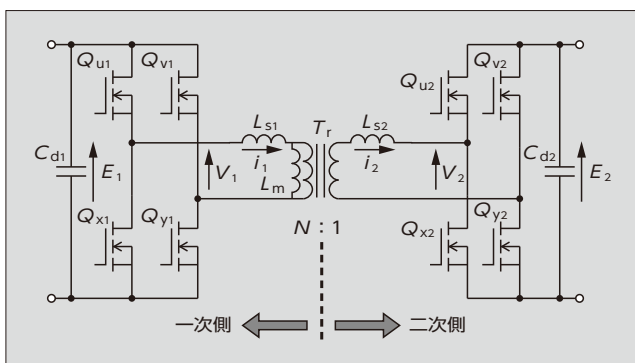


図 3 DAB の回路方式

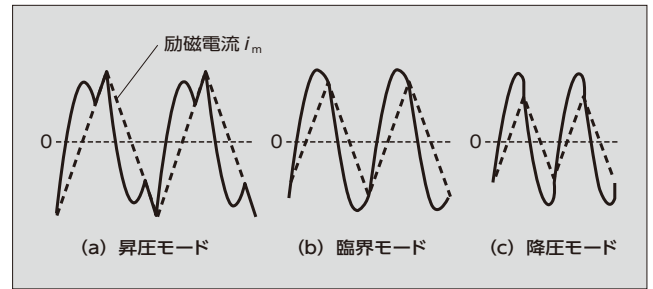


図 4 LLC 共振回路の電流波形

方向動作のため一次側と二次側で入れ替わる。ここでいう“昇圧”はトランスの変圧比  $N:1$  に対して  $E_1 < N \cdot E_2$  を指し、“降圧”は一次側から二次側に電力伝送する場合、 $E_1 > N \cdot E_2$  を指す。入力電圧に対し出力電圧を上げる場合には周波数を下げ、トランス  $T_r$  の励磁電流（並列インダクタンス  $L_m$  の電流）を大きくして、この電流で直列コンデンサ ( $C_{r1}$ 、 $C_{r2}$ ) を充電することにより、直流電圧 ( $E_1$  または  $E_2$ ) よりも高い電圧を交流端電圧 ( $V_1$  または  $V_2$ ) として出力する。一次側から二次側への電力伝送の際、二次側スイッチング素子 ( $Q_{u2} \sim Q_{y2}$ ) は順方向には導通せず、単なる整流素子（ダイオード）として動作する。電圧を下げる場合には、周波数を上げることで、直列リアクトル ( $L_{s1}$ 、 $L_{s2}$ ) での電圧降下を大きくする。

LLC 共振コンバータは、共振回路の直列共振点〔図 4 (b) の臨界モード〕付近では、共振回路の力率が 1 に近づくため高い効率を示すが、昇圧モードでは大きな励磁電流を流すことによる損失が大きくなる。特に、軽負荷時には励磁電流が交流電流の大部分を占めるようになり、著しく効率が低下する場合がある。

電力変換装置の効率については、従来は定格出力の効率が重視されていたが、実際の運用において伝送電力が装置定格に近くなることはむしろ稀（まれ）である。このため年間運用でのトータルエネルギー効率を改善するために、50% 負荷やさらなる軽負荷で、高効率を維持することが求められるようになってきている。したがって、回路方式も幅広い負荷範囲で高効率となるものが望ましい。

DAB は、一見 LLC 共振コンバータから共振コンデンサ ( $C_{r1}$ 、 $C_{r2}$ ) を除去しただけで、構成上大差ないように見えるが、その動作は大きく異なる。

この回路は、一次側および二次側の両方に能動的にスイッチング可能な素子が配置されていることを利用して、双方のスイッチング動作により出力制御を行う。図 5 に DAB の動作波形（位相差制御）を示す。一次電圧 ( $V_1$ ) と二次電圧 ( $V_2$ ) にタイミング差  $t_d$  による位相差を持たせ（位相シフト）、電圧極性の差異により電流の増減を行うものである。例えば、一次直流電圧  $E_1$  より二次直流電圧  $E_2$  が高い場合にも、正の一次電圧に対し負の二次電圧を与えることで正の電流を増加させ、昇圧動作を行うことが可能である。そのため、LLC 共振コンバータと異なり昇圧のために励磁電流を増加させる必要がなく、また直列コンデンサも不要である。

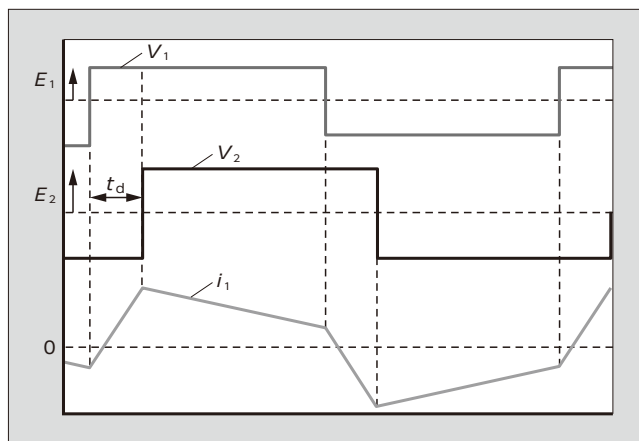


図5 DABの動作波形（位相差制御）

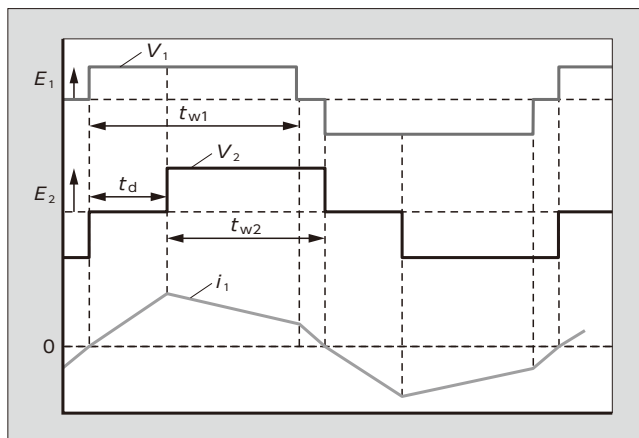


図6 DABの動作波形（位相差・パルス幅制御）

さらに、一次側と二次側ともにフルブリッジ構成であるので、一次電圧および二次電圧は、正、ゼロ、負の三つのレベルを設けることができ、より細かい制御が可能となる。これを利用した DAB の動作波形（位相差・パルス幅制御）を図6に示す。 $t_d$ に加えパルス幅（ $t_{w1}$ 、 $t_{w2}$ ）による制御を併用したものである。

この制御機能を活用することにより、DAB は LLC 共振コンバータよりも入出力電圧の広い範囲にわたって高い効率を維持することが可能となるので、電池と直流母線との電圧整合手段として用いる場合、対称形 LLC 共振コンバータより効率面で有利になる<sup>(1)</sup>。また、高耐圧を要する共振コンデンサが不要になる利点もある。これらの理由により、双方向絶縁 DC/DC コンバータの回路方式として DAB を採用した。

#### ④ 試作機による性能の検証

直流配電システムへの適用を想定した DAB 方式の双方向絶縁 DC/DC コンバータを試作して性能を検証した。表1に試作変換ユニットの仕様を、図7に試作変換ユニットの回路構成と主要部品の外観を示す。容量は 200 kW とし、大容量かつ高周波動作を実現するため、スイッチング素子には富士電機製 SiC-MOSFET (Metal-Oxide-

表1 試作変換ユニットの仕様

| 項目                            | 仕様                         |
|-------------------------------|----------------------------|
| 容量                            | 200 kW                     |
| 回路方式                          | DAB (Dual Active Bridge)   |
| スイッチング素子                      | All-SiCモジュール               |
| 動作周波数                         | 16 kHz                     |
| 一次電圧・二次電圧                     | 400 ~ 800 V/700 ~ 800 V    |
| トランス $T_r$                    | 容量                         |
|                               | 100 kW×2台<br>(一次側直列・二次側並列) |
|                               | コア材                        |
|                               | ナノ結晶軟磁性材料                  |
| コンデンサ ( $C_{d1}$ 、 $C_{d2}$ ) | フィルムコンデンサ、910 $\mu$ F      |
| 変調方式                          | パルス幅制御+位相シフト               |

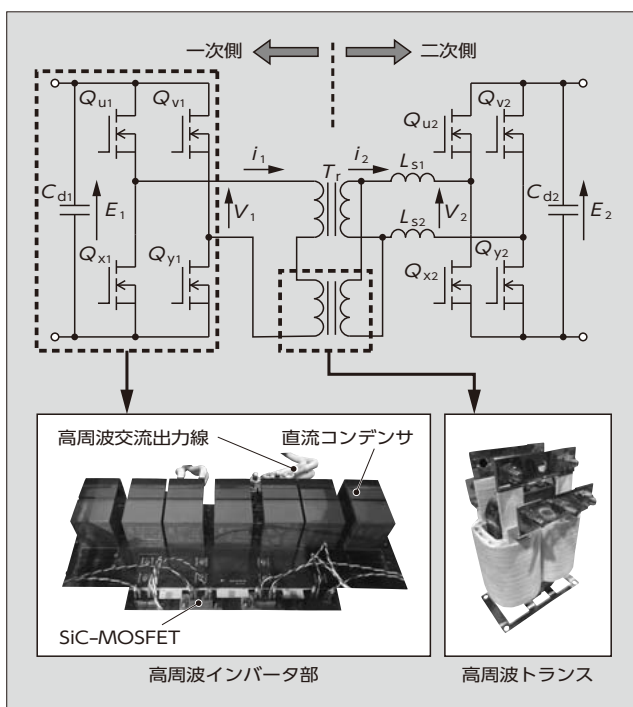


図7 試作変換ユニットの回路構成と主要部品

Semiconductor Field-Effect Transistor) モジュールを用いた。トランスのコア材には、同様に大容量・高周波に適するナノ結晶軟磁性材料を用いた。入手が容易な市販のコアを使うことを前提に 1 台当たりの容量を 100 kW とし、2 台を一次側で直列、二次側で並列接続として 200 kW 相当とした。

SiC-MOSFET の高周波特性を活用し、スイッチング周波数は 16 kHz とした。これにより、絶縁トランスは同じ電力を伝送する商用周波数用のものに比べて、体積は 11%、質量は 7% になる。

$L_{s1}$ 、 $L_{s2}$  は最小電圧が高く、したがって電流の小さくなる二次側のみに配置した。これらは一次・二次間で直列に作用するため、リアクトル全体としての動作は図3に示したものと同様である。直流部のリップル周波数は動作周波数の 2 倍に当たる 32 kHz となり、周波数が高いため大容量の平滑コンデンサは不要である。このため、一般的な電力変換装置で用いられる有寿命の電解コンデンサに代えて、

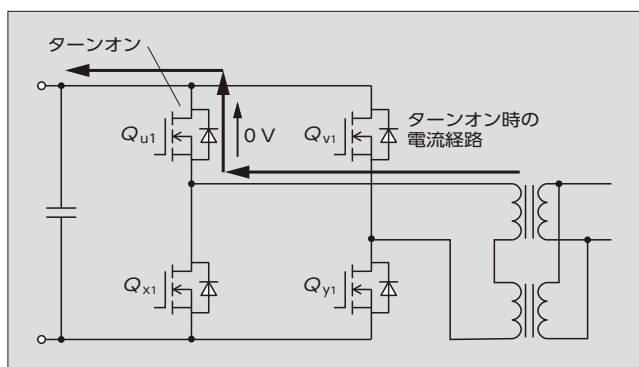


図8 ゼロ電圧ターンオン（ソフトスイッチング）

小型のフィルムコンデンサを用いた。

スイッチング素子の制御には、図6に示した位相差とパルス幅を制御する動作に加え、富士電機が独自に開発したパルスタイミング制御を用いた。これによって入出力電圧の広い範囲でスイッチング素子のピーク電流を抑制した。また、この回路では図8に示すゼロ電圧ターンオンが可能である。これは、スイッチング素子に並列に設けたダイオードが導通している間に主素子をオンすることにより

ゼロ電圧でスイッチングを行い、ターンオン損失の発生を防止するものであり、ソフトスイッチングと呼ばれている。このゼロ電圧ターンオンが入出力電圧の広い範囲で成立するようにし、効率を改善した。さらに回路の伝達特性モデルを制御回路内に内蔵することにより制御性能を改善し、安定性と高速応答特性を確保した。

出力制御としては、直流電圧制御系と直流電流制御系の両方を設け、定電圧モードおよび定電流モードを選択できるようにしている。

試作機の動作の評価結果を図9に示す。一次電圧最小・最大、二次電圧最小・最大の組合せの各条件において、定格電力を一次側から二次側に伝送した際の、一次側ブリッジ回路と二次側ブリッジ回路の高周波交流電圧（ $V_1$ 、 $V_2$ ）と一次電流  $i_1$  の波形を評価した。いずれの条件においても、図5あるいは図6で示したように位相差とパルス幅の調整により電圧と電流が制御され、結果的に所望の電力が得られていることを確認した。定格電圧条件（入力 600 V・出力 750 V）における変換効率率は 98.0% であった。なお、 $E_1=400$  V、 $E_2=800$  V 条件において一次電圧波形に現れるサグ状の波形は、SiC-MOSFET の寄生キャパシタンス充放電に伴うものであり、回路動作上正常なものである。

## ⑤ 容量の拡張性

今回開発した DC/DC コンバータユニットは、前述した試作機でも実施したように、直列または並列に接続することで容量や電圧範囲を拡張し、幅広い用途に適用することができる。図10にユニットの直並列接続を示す。4台のユニットを一次側で並列に、二次側で直列に接続した構成であり、電力は 800 kW、最大電圧は 3,200 V となる。負出力（ $N_2$ ）を接地した場合、最上位のユニットの対地電位は 3,200 V となるので、トランスの一次・二次間絶縁耐圧はこれを前提として設計している。

直列接続した側では、各ユニットの電圧バランスを取る必要があるため、出力電圧が全電圧/ユニット数になるよ

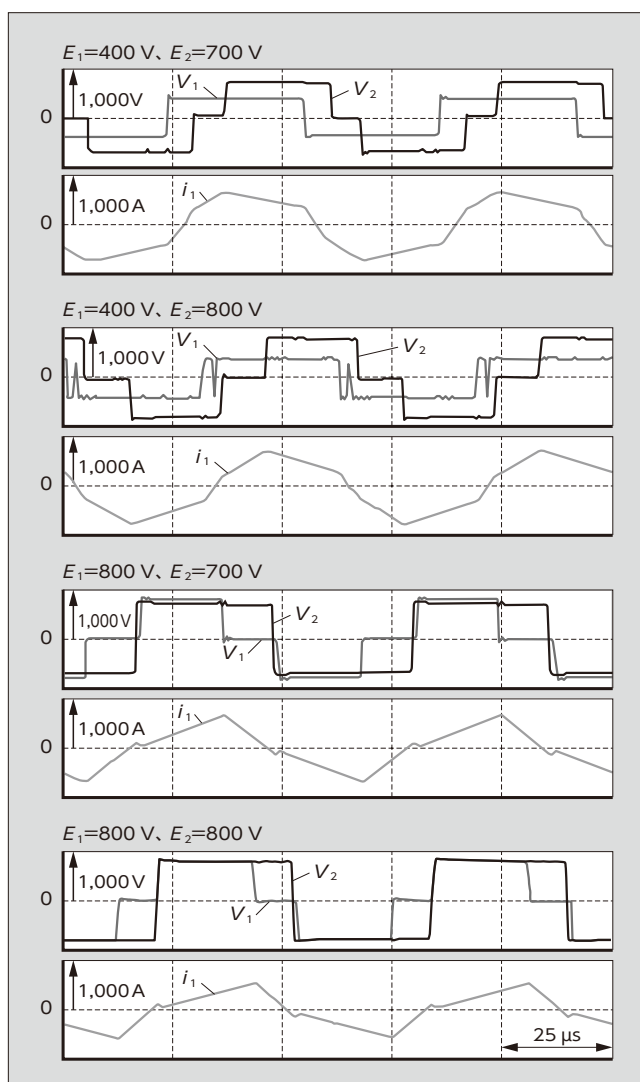


図9 試作機の動作の評価結果

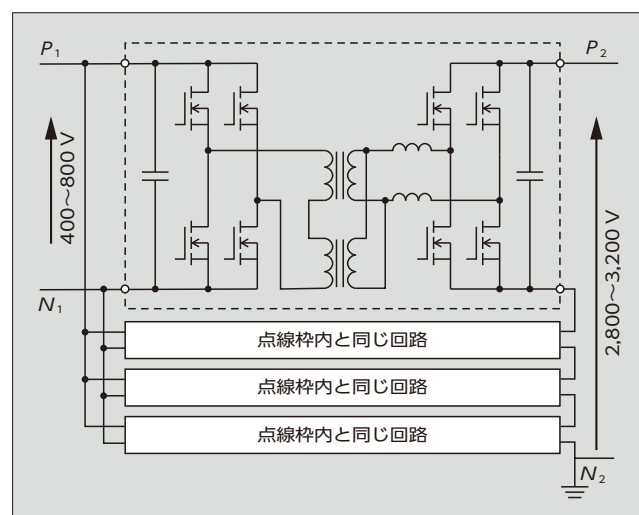


図10 ユニットの直並列接続



うに各ユニットにおいて伝送電力の調整を行う。

図 10 のユニット群を並列接続することにより、さらに電力容量の大きいシステムを構築することも可能である。

## ⑥ あとがき

高効率な直流配電システムの構築を可能にする DC/DC コンバータについて述べた。再生可能エネルギーなどの直流配電システムに適用することができる絶縁型で、双方向の電力伝送が可能な大容量直流変換装置を開発し、200 kW の単位変換ユニットを試作して評価した。回路構成として一次側と二次側が対称構成となるデュアルアクティブブリッジを採用し、SiC-MOSFET による高周波スイッチングによる絶縁トランスの小型化を実現した。併せて回路動作や伝送特性に合った制御方式を開発した。

変換効率については、定格条件で 98% に達する高効率を得られた。引き続き、今回開発した双方向絶縁 DC/DC コンバータをキーコンポーネントとする直流配電システムの実用化に取り組み、お客さまのカーボンニュートラルの実現に貢献する所存である。

## 参考文献

- (1) Yamada, R. et al. “Improvement of Efficiency in

Bidirectional DC-DC Converter with Dual Active Bridge Using GaN-HEMT”, IEEJ Journal of Industry Applications. 2023, vol.12, no.3, p. 264-272.



### 依田 和之

新製品のマーケティング、技術企画に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部新製品開発プロジェクト室担当部長。電気学会会員。



### 田重田 稔久

パワーエレクトロニクス製品の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー変換技術研究部マネージャー。電気学会会員。



### 山田 隆二

UPS、情報用電源などのパワーエレクトロニクス機器の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー変換技術研究部担当部長。電気学会会員。





\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。