

# 電界結合を適用した高パワー密度電力変換器

## High Power Density Capacitively Coupled Power Electronics Converter

有田 圭吾 ARITA Keigo 林 祐輔 HAYASHI Yusuke 高尾 和人 TAKAO Kazuto

再生可能エネルギーや蓄電池の導入を促進し、カーボンニュートラルを実現するため、電力システムとの接続や電力制御に用いられる電力変換器（コンバーター）の高パワー密度（注1）化（小型化）・高効率化が強く求められている。

そこで東芝は、コンバーターを小型化するために、電界結合方式を適用した絶縁型DC（直流）-DCコンバーター（以下、電界結合コンバーターと略記）を開発した。電界結合方式は、キャパシターを用いて絶縁することが特徴であり、従来絶縁のために用いられて大きな体積を占めていたトランスを取り除くことで、小型化を実現できた。試作器により、最大98.8%の高効率と、従来（磁気結合）器と比較してパワー密度を1.5倍の15 W/cm<sup>3</sup>へ大幅に向上できることを実証した。

With the drive to implement renewable energy sources and storage batteries and achieve carbon neutrality, demand continues to grow for high power density, more compact, higher efficiency power converters used for connection to power systems and in power control.

With this in mind, Toshiba Corporation has developed a capacitively coupled DC-DC converter (hereafter "capacitively coupled converter") as part of efforts to make converters ultracompact. Capacitive coupling is unique for using capacitors as galvanic isolation, achieving a compact design by eliminating the isolating transformer which occupies significant volume in the converter. The prototype demonstrates considerable improvements with a high level of maximum efficiency at 98.8% and a power density of 15 W/cm<sup>3</sup>, which is 1.5 times greater than the conventional state-of-the-art (inductively coupled) converter.

### 1. まえがき

カーボンニュートラルの実現に向けて、今後、太陽光など再生可能エネルギーによる発電システムや蓄電池などの電力貯蔵設備が、大量に導入される<sup>(1)</sup>。これらはコンバーターを介して電力システムに接続・運用されるので、コンバーターの高パワー密度化（小型化）・高効率化はその普及に重要な役割を果たす。

コンバーターのパワー密度は、過去数十年の間、半導体パワーデバイスの高性能化に伴い、向上し続けてきた（図1）。パワーデバイスのオン抵抗の低減は電力変換効率（以下、変換効率と略記）の向上と放熱器の小型化を達成し、高周波動作はインダクターや、トランス、キャパシターなど受動部品の小型化を実現してきた。しかし、パワーデバイスの高性能化が進むにつれて相対的に受動部品の影響が大きくなり、現在では、インダクターやトランスの性能がコンバーターの高パワー密度化の主な障壁となっている<sup>(2), (3)</sup>。

そこで、大きな体積を占めていたトランスをキャパシターに置き換えて、小型化した電界結合コンバーターを開発した。

（注1）出力電力値を体積で除した。小型化効果を表す性能指標。

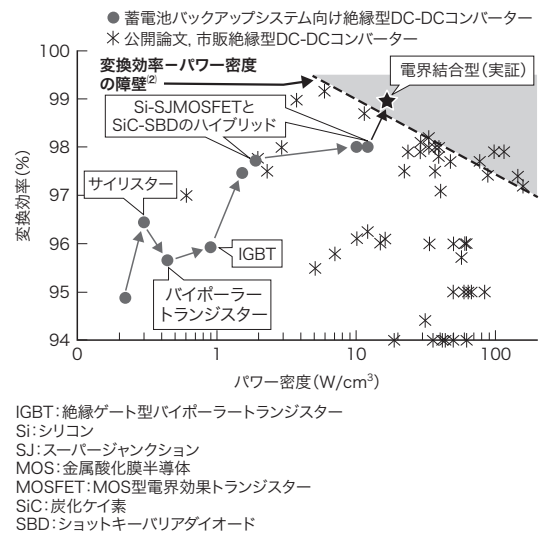


図1. 絶縁型DC-DCコンバーターのパワー密度と電力変換効率

絶縁型DC-DCコンバーターのパワー密度と変換効率は、現在は磁性部品が障壁となり、10 W/cm<sup>3</sup>、99%の点からトレードオフの関係にある。

Isolated DC-DC converter power density and power conversion efficiency

この論文では、トランスやインダクターなどの磁性体部品への依存を軽減した電界結合コンバーターを提案し、太陽光発電システムや蓄電池の出力電圧と相性の良い48Vに適用

した際の高パワー密度化の効果を実証する。2章では電界結合コンバーターの構成と特徴を示す。3章ではパワー密度  $15 \text{ W/cm}^3$ 、変換効率  $98.8\%$  を持つ電界結合コンバーターの実験結果を示し、図1における  $10 \text{ W/cm}^3$ 、 $99\%$  の点から障壁を突破できることを示す。

## 2. 電界結合コンバーターの構成と特徴

### 2.1 電界結合コンバーターの主回路構成

開発した電界結合コンバーターの主回路構成を図2に示す。これは LLC<sup>(注2)</sup> 直列共振コンバーター（以下、LLCコンバーターと略記）の回路であり、一般的な LLCコンバーターに用いられる高周波トランスを、等価回路で表されるインダクター  $L_0$ 、 $L_{r1}$ 、 $L_{r2}$  で置換し、置き換えられた高周波トランスに代わり直列キャパシター  $C_{r1}$ 、 $C_{r2}$  で DC 電位を分離する電力変換回路である。主に高周波交流電圧を発生させる1次側フルブリッジ回路（トランジスター  $Q_{p1} \sim Q_{p4}$ ）、高周波交流電力を送る共振回路（受動部品  $L_{r1}$ 、 $L_{r2}$ 、 $C_{r1}$ 、 $C_{r2}$ 、 $L_0$ ）、及び高周波電力を整流する2次側フルブリッジ回路（トランジスター  $Q_{s1} \sim Q_{s4}$ ）で構成される。

LLCコンバーターは共振回路で生成される高周波電流のゼロ点近傍で  $Q_{p1} \sim Q_{p4}$  と  $Q_{s1} \sim Q_{s4}$  のオンとオフを切り替えて、ソフトスイッチングを実現する。高周波動作において半導体パワーデバイスの発熱は小さく、一般的な LLCコンバーターの電力損失・体積は主に高周波トランスに起因する<sup>(4)</sup>、<sup>(5)</sup> ことから、電界結合コンバーターは高周波トランスを取り除いたことで高パワー密度化が期待できる。

### 2.2 電界結合コンバーターの特徴

以下に、電界結合コンバーターの主な特徴を示す。

- (1) コンバーターの電力損失・体積要因である高周波トランスを必要としないので、高パワー密度化が期待できる。
- (2) コンバーター単体では、変圧比（出力電圧  $V_{out}$  / 入力電圧  $V_{in}$ ）は1に固定であり、変圧比の設計自由度はない。
- (3) 絶縁に用いる直列キャパシターの定格電圧の範囲で、直列接続による高電圧の変換動作が可能である。

図2に示す電界結合コンバーターの変圧比は1であり、高周波トランスを用いた磁気結合コンバーターのように、巻数比の調整で変圧比を大きくして高い電圧を出力することは、困難である。しかし、電界結合コンバーターは直列キャパシターの定格電圧の範囲で直列接続でき、複数の電界結合コンバーターを用いて様々な変圧比を達成できる。

$N$  台の電界結合コンバーターを用いて変圧比  $N$  を実現す

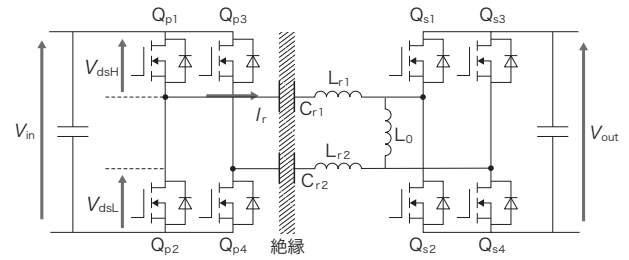


図2. 電界結合コンバーターの主回路構成

電界結合コンバーターは、高周波トランスの代わりに直列キャパシターを用いて DC 電位を分離する。

Capacitively coupled converter circuit configuration

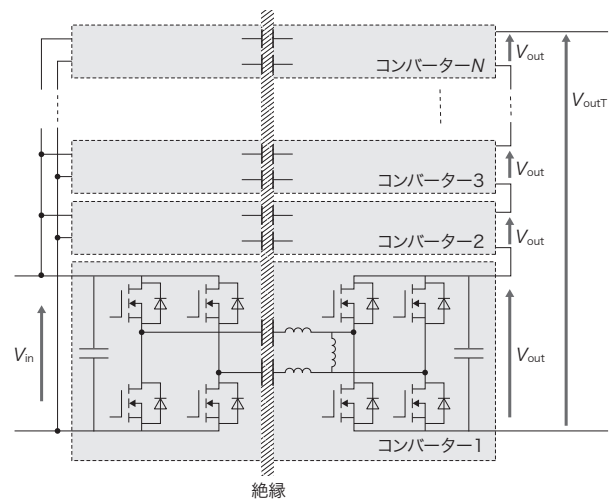


図3. 入力並列・出力直列で複数台を接続した電界結合コンバーター

$N$  台の電界結合コンバーターを直並列接続することで、系統の電圧に合わせて、任意の電圧を出力できるコンバーターを実現する。

Capacitively coupled converters connected in input parallel/output series

るための回路構成を図3に示す。それぞれの電界結合コンバーターの入力端子を並列接続し、各出力端子を直列接続した変換回路である。各電界結合コンバーターが共通の  $V_{in}$  に対して  $V_{out}$  を出力するため、回路全体の出力電圧  $V_{outT}$  は  $N \cdot V_{out}$  となる。変圧比1の  $48 \text{ V} \sim 48 \text{ V}$  電界結合コンバーターを8台用いて  $48 \text{ V} \sim 384 \text{ V}$  コンバーターを構成することにより、太陽光発電システムや蓄電池を、例えば  $380 \text{ V}$  の DC 給電システムに接続して運用することが可能となる。

また、図3に示す変換回路全体のパワー密度と変換効率は、理想状態において電界結合コンバーター単体のパワー密度と変換効率に一致する。そのため、パワー密度の高い  $48 \text{ V} \sim 48 \text{ V}$  電界結合コンバーターを開発することにより、様々な電圧の系統に蓄電池などを接続するためのコンバー

(注2) 二つのインダクター (L) とコンデンサー (C) で構成された共振回路。

ターを全て高パワー密度化することができる。

### 3. 電界結合コンバーターの試作と特性評価

試作した電界結合コンバーターの回路パラメーターを表1に示す。 $V_{in}$ ,  $V_{out}$ はそれぞれ48 Vとし、定格出力電力 $P_{out}$ は450 Wとした。 $Q_{p1} \sim Q_{p4}$ ,  $Q_{s1} \sim Q_{s4}$ のスイッチング周波数 $f_{sw}$ はいずれも187 kHzとし、共振回路を構成

表1. 電界結合コンバーター試作器の回路パラメーター  
Capacitively coupled converter prototype circuit parameters

項目	記号	値
入力電圧	$V_{in}$	48 V
出力電圧	$V_{out}$	48 V
定格電力	$P_{out}$	450 W
スイッチング周波数	$f_{sw}$	187 kHz
トランジスター	$Q_{p1} \sim Q_{p4}$ $Q_{s1} \sim Q_{s4}$	オン抵抗2.2 m $\Omega$ , 耐圧80 V
並列インダクター	$L_0$	インダクタンス33 $\mu$ H
直列インダクター	$L_{r1}$ , $L_{r2}$	インダクタンス250 nH, 250 nH
直列キャパシター	$C_{r1}$ , $C_{r2}$	キャパシタンス2.0 $\mu$ F, 2.0 $\mu$ F

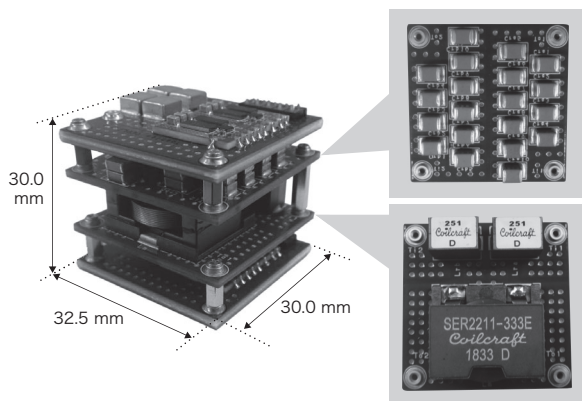


図4. 電界結合コンバーター試作器の外観

試作した48 V–48 V, 450 W電界結合コンバーターは、包絡体積が29.3 cm<sup>3</sup>であり、パワー密度は15.3 W/cm<sup>3</sup>である。

Capacitively coupled converter prototype external view

表2. 電界結合コンバーター試作器の構成部品の仕様

Capacitively coupled converter prototype component specifications

部品	記号	値
トランジスター	$Q_{p1} \sim Q_{p4}$ $Q_{s1} \sim Q_{s4}$	EPC2021 (オン抵抗2.2 m $\Omega$ , 耐圧80 V)
並列インダクター	$L_0$	SER2211-333 (インダクタンス33 $\mu$ H, 定格電流7.1 A)
直列インダクター	$L_{r1}$ , $L_{r2}$	SLR7010-251 (インダクタンス250 nH, 定格電流32 A)
直列キャパシター	$C_{r1}$ , $C_{r2}$	C1812C204KAGLCAUTO (キャパシタンス0.2 $\mu$ F, 定格電圧250 V, 10並列)

する直列インダクター  $L_{r1}$ ,  $L_{r2}$ と直列キャパシター  $C_{r1}$ ,  $C_{r2}$ は共振周波数が周波数 $f_{sw}$ とほぼ等しくなるようにそれぞれ250 nH, 250 nH, 2.0  $\mu$ F, 2.0  $\mu$ Fとした。

試作した48 V–48 V, 450 W電界結合コンバーターの外観を図4に示し、用いた電子部品の仕様を表2に示す。フルブリッジ回路を構成する $Q_{p1} \sim Q_{p4}$ ,  $Q_{s1} \sim Q_{s4}$ は、Si(シリコン)パワーデバイスと比較してオン抵抗が低く高速スイッチングが可能なオン抵抗2.2 m $\Omega$ , 耐圧80 VのGaN(窒化ガリウム)トランジスターEPC2021(EPC社製)を用いた。共振回路を構成する $L_{r1}$ ,  $L_{r2}$ はそれぞれインダクタンス250 nH, 定格電流32 AのSLR7010-251(Coilcraft社製)とし、並列インダクター $L_0$ はインダクタンス33  $\mu$ H, 定格電流7.1 AのSER2211-333(Coilcraft社製)とした。また、 $C_{r1}$ ,  $C_{r2}$ は、それぞれキャパシタンス0.2  $\mu$ FのC1812C204KAGLCAUTO(KEMET社製)を10個並列接続することにより、表1で定めた2.0  $\mu$ Fを実現した。

電界結合コンバーター試作器の出力電力450 Wにおける電圧・電流波形を図5に示す。 $V_{in}$ ,  $V_{out}$ はそれぞれ48 Vであり、表1に等しい電圧を確認できる。 $I_r$ は共振回路を流れる電流を表し、1次側フルブリッジ回路で生成されたスイッチング周波数に等しい高周波電流が、2次側回路に伝送されることを確認できる。また、 $V_{dsH}$ ,  $V_{dsL}$ はそれぞれ $Q_{p1}$ ,

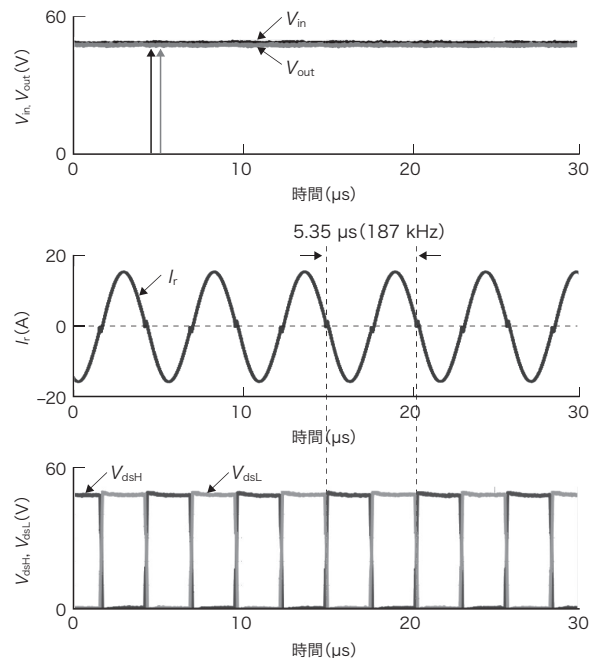


図5. 電界結合コンバーター試作器の電圧・電流波形

出力電力450 Wでの電圧と電流を測定し、48 Vの入力・出力電圧とトランジスターのソフトスイッチング動作を確認した。

Capacitively coupled converter prototype voltage and current waveforms

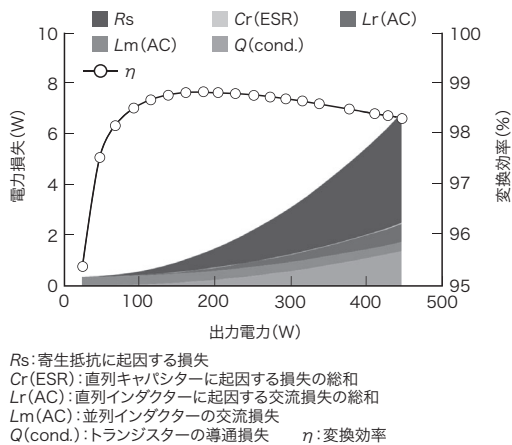


図6. 電界結合コンバーター試作器の変換効率と各部の損失内訳

試作器の変換効率を測定した結果、出力電力220 Wにおいて最大98.8%の高い値を得た。

Capacitively coupled converter prototype conversion efficiency and loss breakdown for each part

$Q_{p2}$ のドレイン・ソース電圧を表す。 $Q_{p1}$ ,  $Q_{p2}$ が $I_r \approx 0$ Aとなるときにスイッチングすることにより、過電圧やリングングが現れないソフトスイッチング動作になることを確認できる。

図6に、試作器のコンバーター全体としての電力損失と電力変換効率 $\eta$ の測定結果、及び各部の電力損失の計算結果を示す。各部の電力損失は、トランジスターの導通損失 $Q$  (cond.), 並列インダクター $L_0$ の交流損失 $L_m$  (AC), 直列インダクター $L_{r1}$ ,  $L_{r2}$ に起因する交流損失の総和 $L_r$  (AC), 直列キャパシター $C_{r1}$ ,  $C_{r2}$ の直列等価抵抗により生じる電力損失の総和 $C_r$  (ESR), 及び回路基板などが持つ寄生抵抗に起因する電力損失 $R_s$ で構成される。各部の電力損失の総和と、コンバーター全体の電力損失が一致することを示している。

図6に示すとおり、 $P_{out}$ の50%である225 Wにおいて最大変換効率98.8%の結果を得た。試作器の包絡体積(最大外形が占める範囲)は図4から29.3 cm<sup>3</sup> (32.5 × 30.0 × 30.0 mm)であり、パワー密度は15.3 W/cm<sup>3</sup> (450 W/29.3 cm<sup>3</sup>)と求められる。したがって、図1における従来(磁気結合)器のパワー密度10 W/cm<sup>3</sup>, 変換効率99%の点から効率をほぼ犠牲にすることなくパワー密度を1.5倍に向上できることが示された。

#### 4. あとがき

コンバーターの高パワー密度化(小型化)を目的として、電界結合方式を適用したコンバーター回路を開発した。一例として、48 V–48 V, 450 W電界結合コンバーターを試作し、実験によりパワー密度15 W/cm<sup>3</sup> (定格出力電力:

450 W, 体積: 約30 cm<sup>3</sup>), 最大変換効率98.8%の達成を確認した。得られた実験結果は、絶縁型DC-DCコンバーターのトップレベルの性能である10 W/cm<sup>3</sup>, 99%に対して、変換効率を犠牲にすることなくパワー密度を1.5倍に向上するものである。開発した回路により、受動部品に起因するパワー密度の障壁を突破できることを実証した。

試作した高パワー密度の電界結合コンバーターは、絶縁に用いられる直列キャパシターの定格電圧の範囲において、直列接続により任意の変圧比を達成可能である。太陽光発電システムや蓄電池など様々な電圧のシステムへの接続に適用することで効率的な電力変換が可能になる。今後は、実用化に向けて開発を進め、温室効果ガス排出量を削減して、将来のカーボンニュートラル実現に貢献する。

#### 文献

- (1) システム技術研究所, 脱炭素社会に向けた長期シナリオ2017. 2017, 82p. <[https://www.wwf.or.jp/activities/data/170215LongTermEnergyScenario2017\\_Final\\_rev2.pdf](https://www.wwf.or.jp/activities/data/170215LongTermEnergyScenario2017_Final_rev2.pdf)>, (参照 2023-07-26).
- (2) Ohashi, H. "Horizon beyond Ideal Power Devices". Proc. 2016 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). San Francisco, USA, 2016-12, 2016, p.548-551.
- (3) Kolar, J. W. et al. "The Ideal Switch is Not Enough". Proc. the 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Prague, Czech Republic, 2016-6, 2016, p.15-22.
- (4) Nakakohara, Y. et al. Three-Phase LLC Series Resonant DC/DC Converter Using SiC MOSFETs to Realize High-Voltage and High-Frequency Operation. IEEE Trans. Ind. Electron. 2016, **63**, 4, p.2103-2110.
- (5) Hayashi, Y. et al. Contactless DC Connector Based on GaN LLC Converter for Next-Generation Data Centers. IEEE Trans. Ind. Appl., 2015, **51**, 4, p.3244-3253. <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7001177/references#references>>, (accessed 2023-07-26).



有田 圭吾 ARITA Keigo  
 研究開発センター  
 先端デバイス研究所 電子デバイスラボラトリー  
 電気学会会員  
 Electron Devices Lab.



林 祐輔 HAYASHI Yusuke, Ph.D.  
 研究開発センター  
 先端デバイス研究所 電子デバイスラボラトリー  
 博士(工学) 電気学会・電子情報通信学会会員  
 Electron Devices Lab.



高尾 和人 TAKAO Kazuto, Ph.D.  
 研究開発センター  
 先端デバイス研究所 電子デバイスラボラトリー  
 博士(工学) 電気学会・IEEE 会員  
 Electron Devices Lab.