

GaN-GITによる小型高効率パワーエレクトロニクス機器

Small and High Efficiency Power Electronics Equipment by using GaN-GIT

原 淳 一 郎*

Jun-ichiro Hara

長 岡 一 彦*

Kazuhiko Nagaoka

GaN-GIT (Gallium Nitride Gate Injection Transistor) はワイドバンドギャップ特性をもつ高耐圧パワースイッチングデバイスであり、これを用いることでパワーエレクトロニクス機器の小型化・高効率化を実現できる。AC-DCコンバータと、モータ駆動用インバータを例に取り、GaN-GITの特長を活かした、パワーエレクトロニクス機器について解説する。

A Gallium Nitride Gate Injection Transistor (GaN-GIT) is a high-voltage power switching device with wide bandgap characteristics, and it can be used to realize miniaturization and high efficiency in power electronics equipment. We will explain power electronics equipment that takes advantage of the features of GaN-GIT, with AC-DC converters and motor drive inverters as examples.

1. GaN-GITがもたらす可能性

GaN-GITは、SiC (シリコンカーバイド) トランジスタとともに、その絶縁破壊電圧、キャリア移動度の高さから、高耐圧・高速スイッチングを実現する新しいパワーデバイスとして注目されている。

第1表は、GaN-GITと、Si (シリコン) を用いた既存のMOS (Metal Oxide Semiconductor) トランジスタ、IGBT (絶縁ゲートバイポーラトランジスタ) との特性比較であり、GaN-GITは、スイッチング性能の指標となる寄生逆方向ダイオードのリカバリー電荷 (Q_{rr})、実効出力容量 ($C_{o(tr)}$)、総ゲート電荷量 (Q_g) が小さく、高速スイッチングが可能である。従って、GaN-GITを採用することでトランジスタのスイッチング損失低減が可能になるとともに、高周波化によってコイル、トランス、コンデンサといった受動部品の小型化ができ、パワーエレクトロニクス機器の小型・高効率化が期待される。

第1表 GaN-GIT, Si-MOSトランジスタ, Si-IGBTの特性比較

Table 1 Characteristic comparison of GaN-GIT, Si-MOS transistor, Si-IGBT

	GaN-GIT (当社製)	Si-MOS トランジスタ	Si-IGBT
V_{DSS} [V]	600	600	650
V_{th} [V]	1.2	3.5	6.0
$R_{DS(ON)}$ [m Ω]	56	56	66
Q_{rr} [nC]	0	なし	200
$C_{o(tr)}$ [pF] @400 V	106	1/10	-
Q_g [nC]	5.0	1/10	64

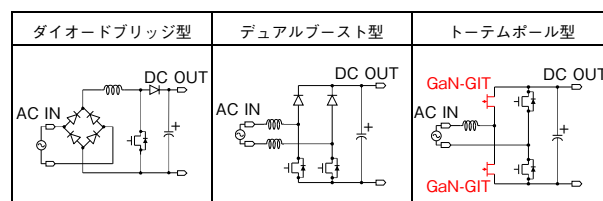
* オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社
ネクストパワーエレ事業推進室
Power Electronics Business Development Office,
Automotive & Industrial Systems Company

2. AC-DCコンバータへの適用

AC-DCコンバータはPFC (Power Factor Correction, 力率改善回路) 部と絶縁DC-DC部で構成されるが、上記GaN-GITの低スイッチング損失特性を活かすと、高周波化に伴う損失増加が抑えられ、さらに、高周波化による受動部品の小型化を実現できる。

2.1 PFC部

PFC部 (AC200 V \Rightarrow DC380 V変換部) は、高効率化のためダイオードブリッジレス化が進み、第1図に示すような、コイルを2つ必要とするが整流制御が容易なデュアルブースト型や、整流制御が複雑だがコイルを1つにでき、トランジスタブリッジ化で最も低損失となるトータムポール型が採用されている。



第1図 PFC部の代表的回路構成

Fig. 1 Topology of PFC

Si-MOSトランジスタは、デュアルブースト型に適用されるが、ドレイン-ソース間のpn接合によるボディダイオードが存在し、トランジスタブリッジ化するとその Q_{rr} による損失が発生するため、トータムポール型への適用は困難であった。

一方、GaN-GITは、構造上ボディダイオードが存在せず Q_{rr} がゼロであるので、リカバリー損失がなく、トータムポール型に最適なデバイスである。

今回、Si-MOSトランジスタを用いた他社製デュアルブースト型PFC部に対し、GaN-GITをトータムポール型のPFC部（400 W）に適用し高周波化（100 kHz）した結果、効率が1%高い98%を実現した。

2.2 絶縁DC-DC部

絶縁DC-DC部（DC380 V⇒DC12 V変換部）にはソフトスイッチング方式の1つであるLLC回路を採用した。LLC回路は、LC共振を用いて、トランジスタ電流がほぼゼロのときにトランジスタをオフさせるゼロカレントスイッチングと、ドレイン-ソース間電圧が0 Vのときにトランジスタをオンさせるゼロボルトスイッチングを行う、スイッチング損失が少ない高効率な回路である。

Si-MOSトランジスタを用いたLLC回路は、スイッチング周波数を100 kHz以下で設計する。これは、ドレイン-ソース間の容量成分である $C_{o(tr)}$ が大きく、オン・オフ切り替わり時の遷移時間が長いため、それ以上高周波数化を図ると電力伝達期間が短くなり効率の低下を招くためである。

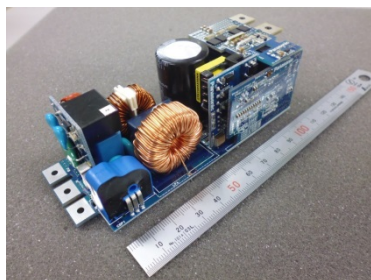
$C_{o(tr)}$ が1/10以下と小さいGaN-GITを用いて100 kHz以上の高周波化を図ると、コイル、トランス、コンデンサの小型化とともに、効率改善が可能である。

今回、Si-MOSトランジスタを用いた他社製絶縁DC-DC部に対し、GaN-GITで絶縁DC-DC部（400 W）に適用しスイッチング周波数を280 kHzに設定した結果、体積を50%に低減し、効率は1%高い97%を実現した。

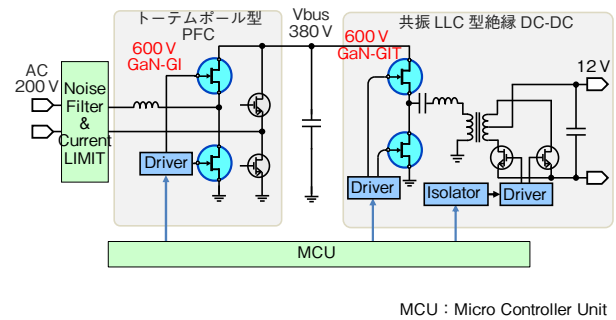
2.3 AC-DCコンバータの試作

GaN-GITを適用したPFC部と絶縁DC-DC部、さらにマイコンなどの制御部を組み合わせた400 WのAC-DCコンバータでは、Si-MOSトランジスタを用いた他社製品に比べ、体積が30%低減し、総合効率は2%（効率92%⇒94%）の向上が図れた。

第2図に全体写真、第3図に回路図を示す。



第2図 GaN-GITを用いたAC-DCコンバータ
Fig. 2 AC-DC converter with GaN-GIT



第3図 GaN-GITを用いたAC-DCコンバータ回路図
Fig. 3 Topology of AC-DC converter with GaN-GIT

3. モータ駆動用インバータへの適用

サーボモータ駆動用のインバータ回路には主にスイッチングスピードの遅いSi-IGBT素子が使われ、その周波数は8 kHz～10 kHzである。これはモータの回転速度が 4000 min^{-1} ～ 10000 min^{-1} であり、高周波化のメリットがないことに起因する。

しかし、GaN-GITを適用すると、同じ周波数でも損失低減を実現でき、発熱対策が容易となる。

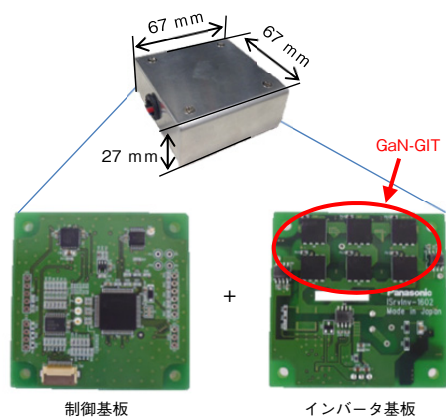
導通損失を決める $R_{DS(ON)}$ が同等なSi-IGBTとGaN-GITを比較すると、Si-IGBTはオフ時のTail current（通常用いられる電子だけでなく、正孔も電流として用いているためにオフ時に発生する電流）によるスイッチング損失が大きいため、効率は96%程度になるが、Tail currentが発生しないGaN-GITの場合、効率は99%にすることができる。

例えば400 Wモータを想定した場合、約16 Wの発熱を4 Wに改善でき、ヒートシンクレスでインバータ回路の小型化を実現できる。

今回、400 Wモータ用インバータ回路にGaN-GITを用いることでヒートシンクレスを実現し、インバータ回路の体積の大幅な小型化（ $500 \text{ cm}^3 \Rightarrow 121 \text{ cm}^3$ ）を実現した。

第4図に、全体写真および各構成基板の写真を示す。

放熱構造を取りにくいアーム型ロボットの内部に本インバータを設置することで、アーム内のパワー配線を簡略化した小径アームを特徴としたロボットも作成可能となる。



第4図 GaN-GITを用いたインバータ

Fig. 4 Inverter with GaN-GIT

4. 動向と展望

パワーエレクトロニクス機器の小型高効率化において、GaN-GITは大きな価値があり、量産機器への採用も進んでいる。

今後は、GaN-GITと受動部品の特性を最適化する技術を深化させ、数10 MHzの動作周波数でも動作可能なGaN-GITの特性を活かせる分野を拡大したい。