

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：55501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05972

研究課題名(和文) GaNトランジスタを用いた太陽光発電部分影対策用1kW級超小型インバータの開発

研究課題名(英文) Over 1kW Micro-inverter for Photovoltaic Cells Using Gallium Nitride Transistor

研究代表者

岡本 昌幸 (Masayuki, Okamoto)

宇部工業高等専門学校・電気工学科・教授

研究者番号：70314820

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではマイクロインバータ用の200 W出力100 kHz GaN FET フライバックコンバータを試作し、動作検証を行った。試作したフライバックコンバータにおいて、GaN FET を並列接続することによって損失低減を図り、電力変換効率を改善した。GaN FET フライバックコンバータの効率測定および損失解析を行い、GaN FETを2並列接続することにより導通損失を24%低減し、電力変換効率を0.9%改善できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, a prototype 200 W and 100 kHz GaN FET flyback converter was constructed and tested. Experimental results demonstrate that the parallel-connection of the GaN FETs is effective to reduce the loss. From the experimental results, loss in the flyback converter with the parallel-connected GaN FETs is reduced by 0.9 % as compared to that in the flyback converter with the single GaN FET.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：窒化ガリウム マイクロインバータ 高効率

1. 研究開始当初の背景

現在インバータ小型化の足かせとなっているのは電力変換のキーデバイスである半導体スイッチの劇的な進歩が困難になってきたことにある。つまり、従来の半導体スイッチには1958年のサイリスタ登場以来、永い間Si（シリコン）が用いられてきたが、半導体製造技術や微細加工技術の進展に伴いインバータの小型化は着実に進められてきたもののSiの物性限界によりこれ以上の性能向上は困難と言われている。このため、近年、導通損失が小さくスイッチングが高速なGaN（窒化ガリウム）トランジスタが次世代の半導体スイッチとして期待されている。特に、導通抵抗がSi系トランジスタの数分の一以下のGaNトランジスタをEPC社、Transphorm社、GaNSYSTEMS社などから入手できるようになり、これらの冷却部品を劇的に小型化できる可能性がある。さらに、スイッチングが速いことから高周波スイッチングを行うことにより受動部品を小型化することも可能と考えられる。

ところで、近年急速に普及しているPV（太陽光発電）の課題として“部分影問題”がある。この問題は特に家庭用PVにおいて、隣接する建物、電柱や木によりソーラーパネルの一部が影となると、発電電力が大幅に低下する問題である。これは、PVでは通常、ソーラーパネルを6から8枚程度直列に接続し、全パネルから得られた直流電力をインバータ（パワーコンディショナ）により交流電力に変換しているため、一部が影となると影のかかったパネルだけでなく全体で取り出せる電力が大幅に低下するためである。この対策として、各ソーラーパネルあるいは数枚のパネルごとにマイクロインバータを取り付ける方法が考えられており（NEP JAPAN社、米国SolarBridge Technologies社など）、急速な普及が始まりつつある。しかしながら、マイクロインバータの電力変換効率率は最大で96%程度であり、一般的なパワーコンディショナの変換効率が97~98%程度であることを考えると改善の余地が残されている。また、これら市販のマイクロインバータはPVパネル単位で設置することを前提としているため、定格が250W程度であるが、1kW程度の変換容量をもつマイクロインバータが実現できれば1台で数枚のソーラーパネルに対応可能であり、インバータ設置の際の自由度が増すことになる。

2. 研究の目的

本研究では、以下の4つの課題を明らかにすることを目的とする。

[1] GaNトランジスタ用共振形ゲート駆動回路の設計および製作 市販されているGaNトランジスタはいずれもゲート閾値電圧が1.5Vから2V程度であり既存のSi系のトランジスタに比べて低いため、高速駆動する場合には電圧サージによる誤点弧を防ぐ必要が

ある。そこで、共振形ゲート駆動回路により、GaNトランジスタを正確かつ高速に駆動する回路の設計・製作を行う。

[2] ゲート駆動回路に対する電流・電圧の高精度測定および回路評価 トランジスタのオンおよびオフ状態の遷移はトランジスタの入力容量に対する充放電によって行われるため、高速なスイッチングを行う場合、トランジスタのゲートには極めて短い期間に数アンペアの電流が流れると同時にゲート電圧が急激に変化する。したがって、トランジスタの遷移状態を観測するためには、ゲート電流およびゲート電圧を高精度に測定する必要がある。しかしながら、通常、プローブを使用する場合には、プローブの持つ容量や配線の寄生インダクタンスを考慮しなければ高精度な測定を行うことが出来ない。そこで、プローブのダイナミクスを考慮することにより、実際の電流・電圧を逆問題的に求める方法により高精度に測定する。そして、この測定法に基づき、[1]で製作するゲート駆動回路の評価を行う。

[3] GaNトランジスタを用いた250W級マイクロインバータの設計・製作および評価 マイクロインバータは太陽光パネルから得られる直流を適切な電圧まで昇圧する昇圧コンバータと、それを交流に変換するインバータにより構成される。ここでは本研究のメインテーマであるインバータの超小型化を達成するため、ゲート駆動回路を含めたマイクロインバータの回路基板レイアウトをデザインする。その際、配線のパターンによる寄生インダクタンスを極力低減できるデザインを考案する。

[4] 1kW級マイクロインバータの製作と部分影対策用マイクロインバータシステムの構築 コンピュータシミュレーションにより、最適なマイクロインバータの設置方策を検討する。さらに、複数のマイクロインバータの出力を制御するメインコントローラのプログラミングおよび実装を行い、マイクロコンバータによるPVシステムの電力変換効率を実験的に検証する。

3. 研究の方法

[1]の共振形ゲート駆動回路の設計に際しては、まず、電気電子回路シミュレータであるLTSpiceを用いてGaNトランジスタのモデルを作成し、I-V特性、C-V特性およびチョップ回路によるスイッチングのシミュレーションを行い、次に実際に回路基板を作製し評価を行う。[2]に関してはGaNトランジスタの特長である高速なスイッチングを観測するため、ホール素子形の電流センサを用いる方法、シャント抵抗に対し受動プローブ、作動（能動）プローブを用いる方法、シャント抵抗にBNCコネクタを取付け、同軸ケーブルにより直接オシロスコープに端子電圧を入力する方法により[1]のゲート駆動回路の評価を行う。[3]については昇圧回路および

インバータの各回路のシミュレーション、設計、製作を行い、動作確認および評価を行う。さらに、GaN トランジスタを並列化し、導通抵抗を低減することによる効率化の検討も併せて行う。[4]についてはコンピュータシミュレーションを行い、構築するシステムの評価を行う。

4. 研究成果

[1]に関してノーマリオン形 GaN トランジスタに対する共振形ゲート駆動回路 (図 1) を製作し、評価を行った。また、[2]に関しては前述の方法によりダブルパルス試験を行った結果、GaN トランジスタの立ち上がり、立ち下がりには非常に速いため、所有する電流センサでは測定誤差が大きいことがわかった。また、差動プローブではノイズが大きく、適切な信号処理が必要であることがわかった。一方、受動プローブを用いる方法および同軸には比較的ノイズが小さく、スイッチング電流の測定に適していることがわかった。

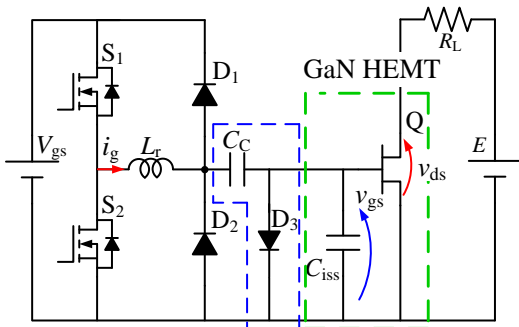


図 1 共振形ゲート駆動回路

図 1 の回路に対して上記受動プローブを用いる方法により測定を行った結果、通常のゲート抵抗を用いる駆動回路と比較して、ターンオン時間が 3%、ターンオフ時間が 38% 高速化できることが確認できた。

[3]に関しては、まず図 2 に示すフライバック方式の昇圧コンバータの回路シミュレーションにより回路定数を決定した後、回路を製作し評価を行った。その際、GaN トランジスタの並列化による効率化についても検討した。

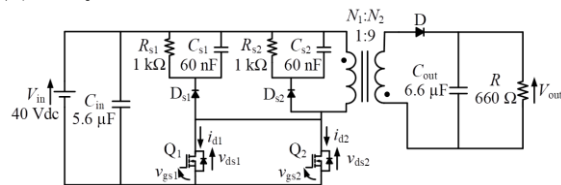
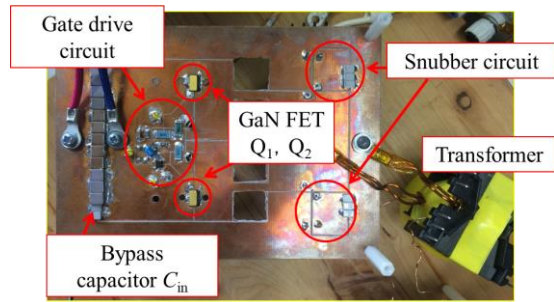


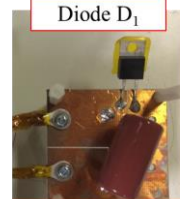
図 2 製作したフライバックコンバータ (GaN トランジスタを 2 並列とした場合)

図 2 に製作したフライバックコンバータの回路図 (GaN トランジスタを 2 個並列に接続した場合) を示すが、入力電圧は 40V、トランスの巻き数比は 1:9 とし、出力電圧を 350V まで昇圧し 200W の出力となるよう設計とし

ている。図 3 に製作したフライバックコンバータの外観を示す。



(a) 一次側



(b) 二次側

図 3 製作したフライバックコンバータの外観

GaN トランジスタ (GaN SYSTEMS 社製 GS66508T) を 2 個並列接続して駆動する際、電流のアンバランスが生じたため、ゲート駆動回路およびスナバ回路が対称となるよう設計している。図 4 に 2 つの GaN トランジスタを流れる電流、出力電圧の波形を示す。なお、GaN トランジスタが正常に駆動できていることを確認するため、片方の GaN トランジスタのゲート-ソース間電圧とドレイン-ソース間電圧も併せて示している。

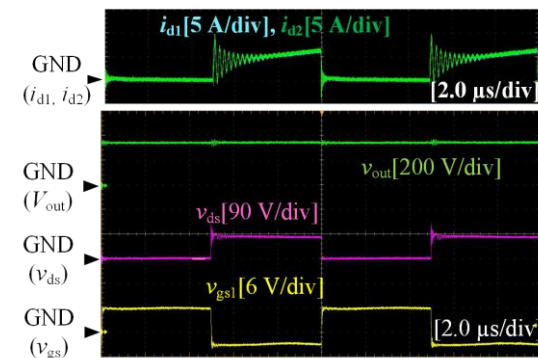
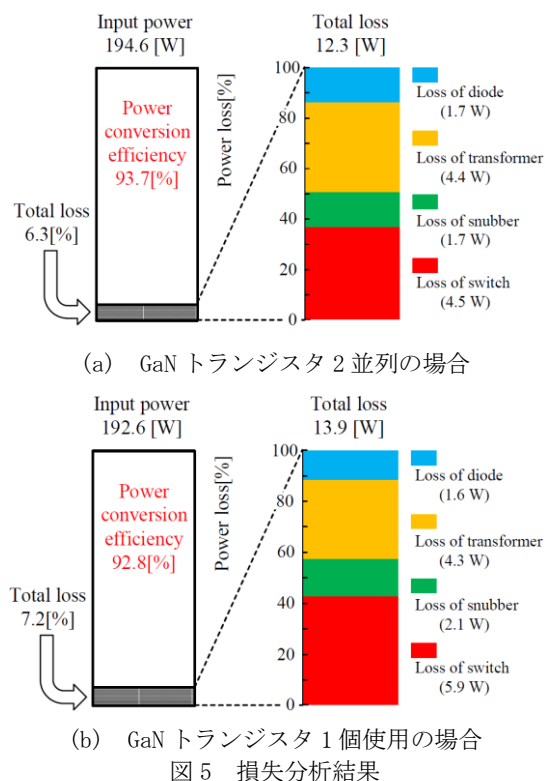


図 4 出力波形

図より、回路基板を 2 つの GaN トランジスタに関して対称に設計したことにより、電流がバランスしていることが確認できる (図では完全に重なっている)。また、出力電圧および出力はそれぞれ 347.9Vdc、197.2W となり、設計した出力が得られていることが確認できる。

次に、電力変換効率を測定した結果、GaN トランジスタを 2 個並列に接続した場合の 93.7% となった。一方、比較のために GaN トランジスタを 1 個使用したフライバックコン

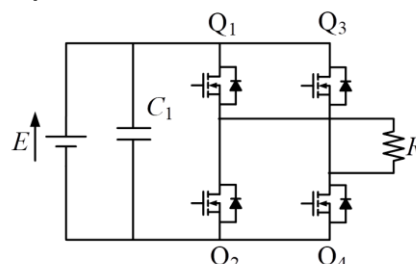
バータも製作し同様にして電力変換効率を測定した結果、92.8%となり、並列化により電力変換効率が0.9%向上することが確認できた。これらの回路においてさらに詳細な損失分析を行った結果を図5に示す。なお、(a)はGaNトランジスタを2個並列に接続した場合、(b)は1個のGaNトランジスタを使用した場合の損失分析結果である。



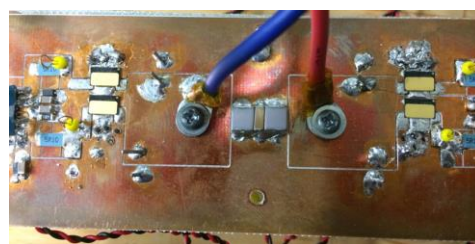
並列化により導通損失が大幅に低減されることを期待したが、導通損失は2並列化により4.7Wから2.5Wとなり47%程度低減できたもののスイッチング損失が1.2Wから2.0Wと67%程度増大したため、全体としての効率の向上は0.9%となった。したがって、さらなる低損失化を図るためには、ダイオードおよびスナバ回路の損失を低減化する工夫（アクティブクランプ方式の採用など）やトランスにおける鉄損の低減化が必要と考えられる。

次に、フルブリッジインバータの設計および製作を行った。図6にインバータの回路図(a)および製作した回路の外観(b、c)を示す。使用したGaNトランジスタは上と同様GS66508Tであるが、ボディダイオードの順方向閾値電圧が高いため、CREE社製のSiCショットキーバリアダイオードを使用している。フルブリッジインバータでは、前段（前述）の昇圧回路の出力350Vdcを実効値が200V、60Hzの交流に変換する必要があるが、入力電圧（直流）を上昇させる際に問題が生じた。図7にGaNトランジスタ Q_1 および Q_2 のゲートソース間電圧を示す。 Q_1 および Q_2 は上下に接続されたGaNトランジスタであるが、図7より、一方のトランジスタがターンオンする瞬間に他方のトランジスタのゲート-ソ-

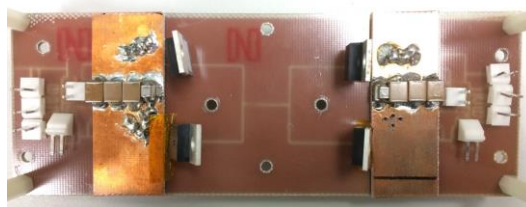
ース間電圧にサージ（ソース電位の振動）が発生していることが確認できる。この電圧サージは入力電圧を上昇させるとともに増大し、図7に示す入力電圧30Vdcで2.5V程度になっていることが確認できる。使用したGaNトランジスタGS66508Tの（ゲートオン）閾値電圧は1.7V程度であるため、ゲート駆動回路ではオフ時に-3Vまで負電圧に引き込むよう工夫しているが、これ以上入力電圧を上昇させると誤点弧が生じ、上下のGaNトランジスタが破壊される恐れがある。そのため、このサージを抑制させるため幾つかの対策を試みた。



(a) インバータ回路図



(b) 外観（表面）



(c) 外観（裏面）

図6 製作したインバータの回路図および外観



図7 Q_1 、 Q_2 のゲート-ソース間電圧

まず、ソース電位の変動がドレイン-ソースの急峻な変化によるものと仮定し、ゲート抵抗を100Ω、1000Ωと増加させた場合、ゲート-ソース間電圧およびドレイン-ソース間電圧の立ち上がり、立下りは緩やかになり、サージがある程度抑制できることが確認できた。しかし、当然のことながらスイッチングのスピードを抑制すればスイッチング損失が増大するため、合理的な対策ではない。そこで、上下のトランジスタの直近にバイパ

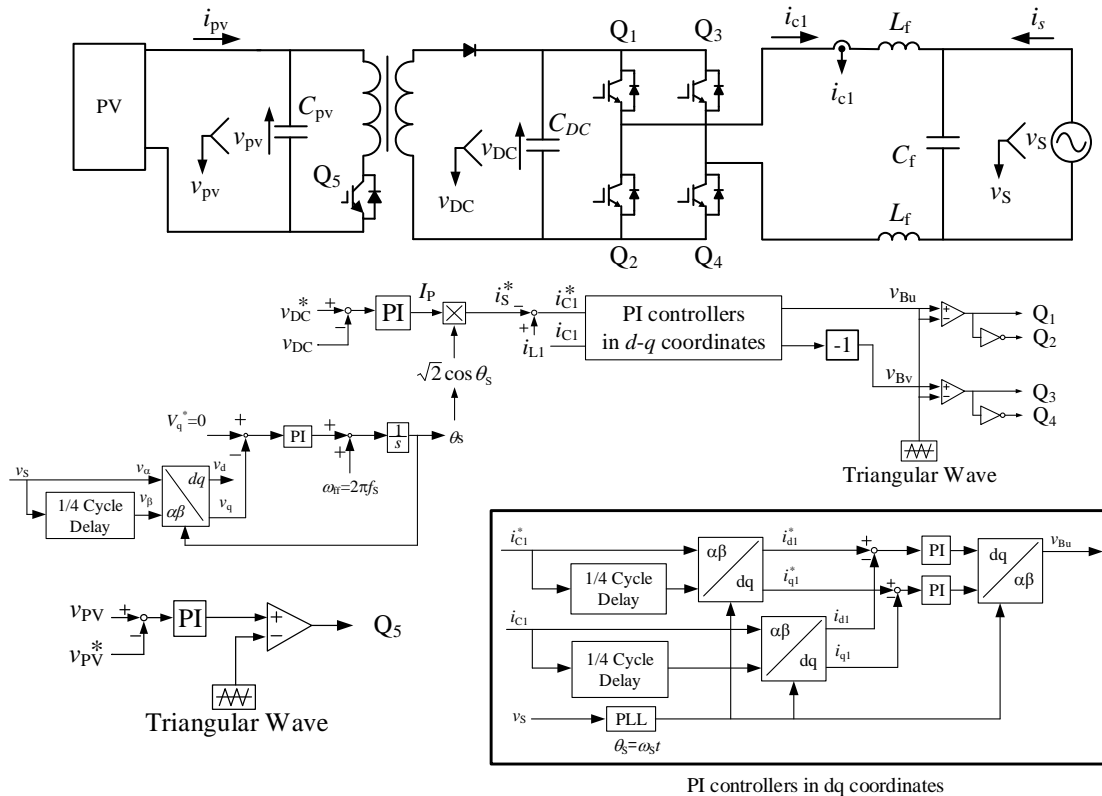


図8 マイクロインバータのシステム図

ス用のキャパシタを取り付ける、ゲートソース間に並列に大きめのキャパシタを取り付けるなどの対策を行ったが本質的な解決には至らなかった。このようなことから、GaN トランジスタは非常に速い立ち上がり・立下りによりスイッチング時に極めて高い周波数成分を発生し、回路基板上の寄生キャパシタンスを介して様々なパスが生じ、ソース電位の変動を発生させているものと推測される。そのため、今後は回路基板の配線パターンと寄生キャパシタンスによる電流経路を特定し、本質的な対策を行っていく必要があると考えられる。

前述のように[3]の課題を検討中に問題が発生したため、マイクロインバータを定格電力で駆動することができなかったため、マイクロインバータに関してはシミュレーションのみを実行した。図8にマイクロインバータのシステム図を示す。このシステムでは、太陽光モジュール単位の発電電力を系統に逆潮流する。前段の昇圧コンバータでは、単結晶のシリコン太陽電池では照度に依らず最大電力点が一定の電圧となることに注目し、キャパシタ電圧を一定（最大電力点電圧に追従）とする制御法を採用している。後段のフルブリッジインバータでは系統の電圧を参照し、キャパシタ電圧を一定にする制御法により PV による直流電力を系統に逆潮流する。本制御法により、キャパシタ電圧を一定とする簡易な最大電力点追従制御により電力の逆潮流が可能であることを確認した。

本研究課題では1kWクラスのマイクロインバータを構築し、動作確認および評価まで行うことを目標としていたが、実際には1個のトランジスタを正確に駆動することにはある程度の方針が定まったものの、インバータのように上下のスイッチの短絡を防止しつつ、交互にスイッチングさせる際に大きな問題が生じ、それ以上進展させることができなかった。今後は本研究で得た知見を活かし、基板の配線パターンの検討を進め、当初の目的を達成していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

① M. Okamoto, T. Ishibashi, H. Yamada and T. Tanaka, "Resonant Gate Driver for a Normally-On GaN HEMT," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 4, No. 3, pp.926,934, 2016, DOI: 10.1109/JESTPE.2016.2587058

〔学会発表〕(計4件)

① 植村祐太、田中崇寛、岡本昌幸、「GaN トランジスタを用いた非接触給電用 E 級アンプ」、平成 27 年度電気学会中国支部第 8 回高専研究発表会

② 松崎公洋、山田洋明、田中俊彦、岡本昌幸、「ノーマリオフ形 GaN パワーデバイスの評価」、平成 27 年度(第 66 回)電気・情報次関連学会中国支部連合大会

③ 横田康太、岡本昌幸、日高良和、「GaN ト

ランジスタを用いたワイヤレス給電装置」、
平成 29 年度電気学会中国支部第 10 回高
専研究発表会

④ T. Tanimoto, H. Yamada, T. Tanaka and
M.Okamoto, ” Loss Reduction of Flyback
Converter Using Parallel-Connected GaN
FETs,” International Conference on
Innovative Application Research and
Education

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 昌幸 (OKAMOTO, Masayuki)

宇部工業高等専門学校・教授

研究者番号：7 0 3 1 4 8 2 0