

続・ GaN-FET を用いたインバータ電源の製作

○伊藤 康彦^{AB)}、中野 治久^{AC)}、富里 哲夫^{D)}

^{A)} 核融合科学研究所 ^{B)} 技術部、^{C)} プラズマ装置学ユニット、^{D)} ユニオン電機(株)

1. はじめに

国際熱核融合炉（ITER）にて実装が計画されている中性粒子ビーム入射加熱装置（NBI）があり、これに保守性に優れた高周波負イオン源を適用するための研究開発が行われている。NBI 装置の模式図を図 1 に示す。

NBI の動作を簡単に述べると、イオン源で高周波放電により水素プラズマを発生させ、そこから水素負イオンを取り出し、それを加速した後に電氣的に中性化し、残留したイオンを除去して核融合プラズマに入射し加熱する装置である。

現在イオン源にて水素プラズマ放電を励起するためのアンテナコイルに、高周波電力を供給するインバータ電源（周波数 500k $\sim$ 5MHz、 $\sim$ 60kW 目標）を製作中である。前回の報告ではインバータ電源のスイッチング素子に GaN-FET を用いた回路基板の設計法について言及した。今回は基板の試作と簡易動作テスト行ったこと及び、本基板を 8 組のフルブリッジ並列接続として 15kW 出力とするための設計法について報告する。

2. インバータ電源回路

本回路及び周辺回路の構成を図 2 に示し、主要部の動作を説明する。

ハーフブリッジ構成のインバータ回路基板（図 3）2 枚をフルブリッジ構成として 8 並列接続し、直流電源（最大 600V, 15A）出力を最高 5MHz で高速スイッチングを行うことにより、アンテナコイルに高

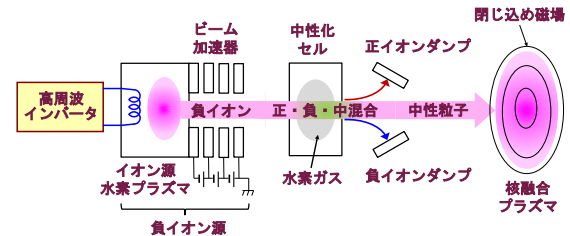


図 1 中性粒子ビーム入射装置

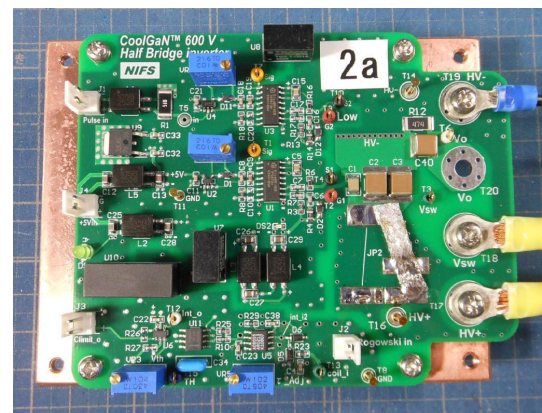


図 3、ハーフブリッジ・インバータ基板

周波電流を供給する。スイッチング素子には GaN-FET（Infineon, IGOT60R070D1）を用いる。本素子はドレイン・ソース間電圧 $V_{DS}=600V$ 、ドレイン電流 $I_{DS}=60A$ 、Slew-rate=200V/ns、ON 抵抗 70m Ω である。

本基板は Infineon 社の評価基板 EVAL_1EDF_G1B_HB_GAN を参考に改造したもので改造箇所は前回報告した^[1]。今回の改造箇所は主

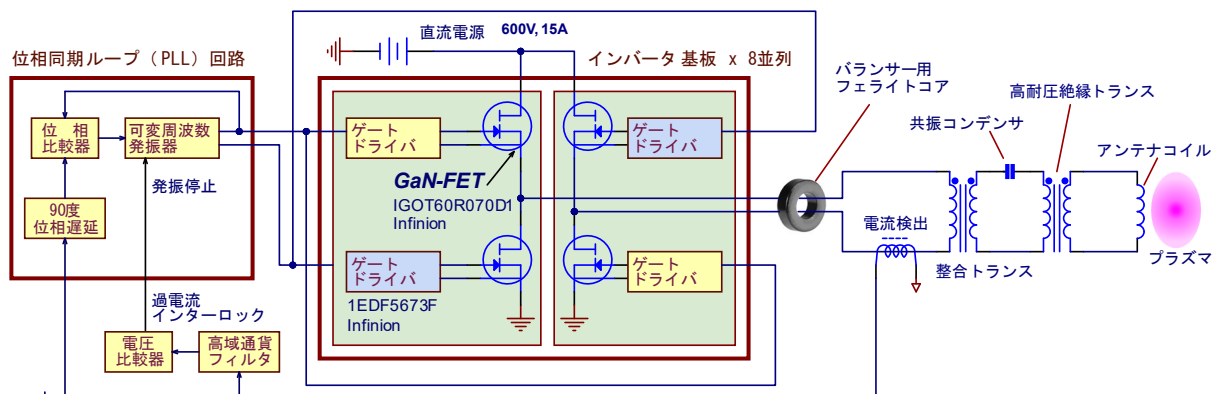


図 2 インバータ電源回路の構成

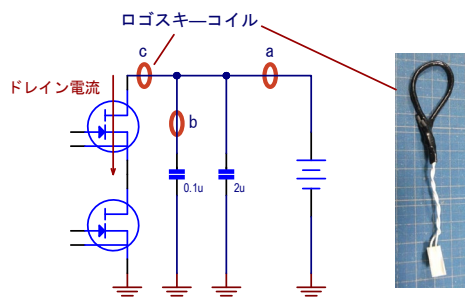


図 4、ドレイン電流検出用ログスキーコイル
実装位置

に GaN-FET の保護回路で、ログスキーコイル (図 4 右) の実装方法を変更した。本コイル (2mm Φ チューブに 0.2mm Φ ポリウレタン線を 40 回巻き) にて GaN-FET のハイサイド側ドレイン電流を検出し、しきい値以上でインバータの動作を停止させる。

最初には本コイルを挿入する線路において、ドレイン電流とバイパスコンデンサに流れる電流が加算された線路に実装してしまったため (図 4-a)、検出波形が鈍ってしまい 500kHz 以上のスイッチング周波数での利用ができなかった。

そこでバイパスコンデンサのみの線路に本コイルを実装してみたが (図 4-b)、検出レベルが低下したのみで効果がなかった。次にドレインのみの線路に本コイルを実装してみたが (図 4-c)、応答速度が改善しなかった。また本コイルの直径を 25mm, 70mm の物でも試したが応答速度は変わらず本コイルの利用を諦めた。

この代替として富里提案による高域通過フィルタ (HP12CH3-0B、R&K 社) を利用することにした。インバータ出力端子直近の電流波形は共振周波数で正弦波に近いが、共振周波数から離れるほど高調波が増加する傾向がある。この性質を利用して本フィルタで高調波成分のみを抽出し、一定振幅値以上になった場合に全インバータ動作を停止させる。

GaN-FET の放熱について当初は水冷を予定していたが 13.56MHz インバータの空冷方式^[2]を参考とし、銅ヒートスプレッドとの絶縁に低熱抵抗値 0.05°C/W である 0.5mm 厚の窒化ガリウム板 (アズワン、67-4574-92) に低熱抵抗値 0.036°C/W の放熱グリス (アイネックス社、JP-DX1) を塗布した。

3. 位相同期ループ (PLL) 回路

プラズマ放電状態の変動により共振周波数が変化すると、負荷に供給する電圧と電流の位相がずれ

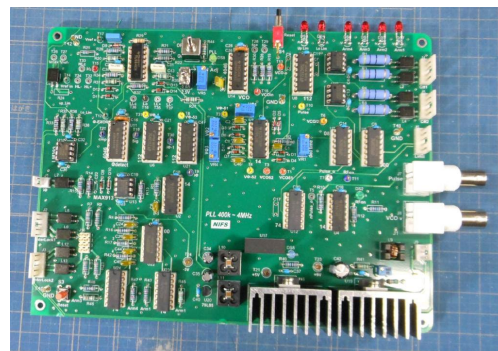


図 5、PLL 回路基板

る。この場合 GaN-FET の Low-side 及び High-side が同時に ON 状態となり、ドレイン供給電源が GND へ短絡し過大電流が流れ、素子が破損する原因となる。これをハードスイッチング状態と呼ぶ。これを避けるため PLL 回路 (図 5) により負荷供給電圧と電流の位相差に応じてスイッチング周波数を制御し、適切な共振周波数に合わせる。

本回路は富里設計による PLL 回路を参照し製作を行った。

4. インバータの並列接続

数 kW 以上の高出力を得るためには、インバータ回路の並列運用が必要となる。本基板は 2 枚 1 組のフルブリッジ又は 1 枚でのハーフブリッジ構成で利用でき、最大出力は 1.5~2kW 程度までである。全体で 16 枚の基板を 1 つの筐体の実装し最大出力 15kW までとし、更にこれを 4 台並列接続し 60kW での運用を計画している。

多チャンネル並列構成では、各基板特性のバラつきにより一部の GaN-FET が過負荷状態になる事を防止するためのバランサー回路^[1]として、各チャンネルの出力部にフェライトコアを挿入した。

5. 動作試験

フルブリッジ 2 並列接続で机上にて動作試験を行っている段階である。

GaN-FET のハードスイッチング動作を避けるた

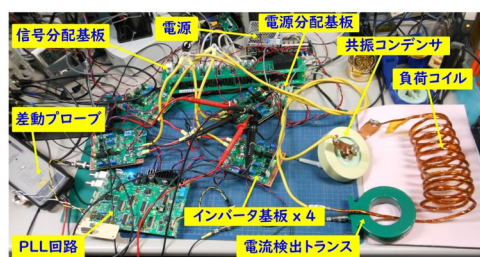


図 6、インバータ動作試験

め、ゲートドライバ IC の入力波形のデューティー比を、CR 積分回路を構成するトリマ抵抗の調節により行う。しかし、インバータ基板及び PLL 調整回路方式に問題があり適切な状態に至っていない。PLL による共振周波数の自動調整については 500k~4MHz に渡って安定した動作が得られている。

上記は机上での微小電力動作であるが、MHz を超える大電力動作になると大きなコモンモードノイズによる妨害を受けることが確実であり、ノイズ対策が必要となる。

5. まとめ

ITER で実装が計画されている NBI の高周波負イオン源の開発研究で利用するインバータ電源回路を製作中である。2 組のフルブリッジ回路を製作し、机上にて動作することを確認した。現在フルブリッジ 8 並列構成を組み込んだインバータシステムを組立中である。最終的にはこれを 4 セット並列運用して 60kW、5MHz を目標とする。

参考文献

- [1]GaN-FET を用いたインバータ電源の製作、伊藤康彦、令和 6 年度筑波大学技術研究会
- [2]MHz 周波数帯のワイヤレス電力伝送における高出力化・高効率化・伝送距離向上のための要素技術研究、大矢根 蒼、名古屋大学大学院工学研究科博士論文、2023 年 3 月

謝辞

インバータ電源設計製作において、ユニオン電機株式会社、富里哲夫氏から多くの貴重な技術的アドバイスを頂いたことに大いに感謝する。