

MHz 周波数のワイヤレス電力伝送に適した高周波電源回路の展開

大矢根 蒼* (東京大学)

Development of High-Frequency Power Supply Circuits Suitable for Wireless Power Transfer at MHz Frequencies

Aoi Oyane (The University of Tokyo)

1. まえがき

6.78MHz や 13.56MHz といった高周波のワイヤレス電力伝送 (WPT) システムが研究されている。この実現には、MHz 帯で大電力を生成する高周波電源が不可欠である。本発表ではまず、高周波電源の主流の回路方式が回路素子の技術革新に伴って短期間で大きく変化してきた事実に着目し、回路方式の変遷・発展を整理する。次に、kW 級の大電力の実現に関して、筆者の研究を中心に最近の課題解決を述べる。

2. 高周波電源の回路方式とその変遷

高周波電源は、リニアアンプと共振インバータに大別される。WPT の研究開発は短期間で急速に進展し、その過程で、主流の電源回路方式も次のように変化している。

<2・1>リニアアンプ これは伝統的な高周波電源であり、パワートランジスタの抵抗値を滑らかに変化させて正弦波出力を生成する。近年の MHz-WPT の研究分野では、より高効率の共振インバータに主流の座を譲りつつある。

<2・2>共振インバータ 半導体の技術発展により、パワートランジスタは高速で開閉する「スイッチ」として利用可能になった。インバータ回路は高周波スイッチングと共振器によって正弦波出力を得る。また、ソフトスイッチングによって 98%以上のような高効率を実現する。

① E 級インバータ⁽¹⁾：この回路は、電流源インダクタ、スイッチ、直列共振器から構成される。2015 年には、E 級をベースとした $\phi 2$ 級回路による 13.56MHz、1.3kW の WPT が報告された⁽²⁾。当時は、E 級インバータが今後の MHz-WPT の主流の電源回路方式となると考えられていた。

E 級インバータのメリットは、必要なスイッチが 1 個だという点にある。デメリットとしては、入力 DC 電圧の 4 倍のスイッチ電圧が生じ高耐圧のスイッチを要すること、電流源インダクタによる電力損失と発熱、負荷変動に対する脆弱性とスイッチの過電圧のリスク、が挙げられる。特に、スイッチ電圧の課題は、大電力化実現の障害となる。

② D 級ブリッジ型インバータ⁽³⁾：これにはハーフブリッジ型とフルブリッジ型がある。これらの回路は、スイッチ電圧が入力 DC 電圧にクランプされるため電圧源回路となる。D 級ハーフブリッジインバータのメリットとしては、上記電圧クランプによりスイッチ電圧が低く安定であること、負荷変動に対して堅牢でありスイッチ過電圧が生じないこと、受動素子が少ないため電力損失が低いこと、が挙げられる。

一方デメリットとしては、スイッチが 2 個必要なこと、絶

縁ゲート駆動回路の必要性、デッドタイム不足時の「アーム短絡」による電力損失、が挙げられる。

3. D 級インバータの有用性と GaN-HEMT による革新

MHz-WPT の研究では E 級インバータの利用が多いが、節 2 の D 級インバータのメリットは注目に値する。スイッチ電圧が DC 入力電圧を超過しない堅牢性ゆえに、D 級インバータは将来の WPT 大電力化において利用価値が高いといえる。

また、電子部品の技術革新によって MHz の D 級インバータの回路技術は一変し、課題が克服され、実用性が急速に向上している。節 2 のデメリットのうち、デッドタイム設定に関する困難は、窒化ガリウムの高電子移動度トランジスタ (GaN-HEMT) の登場によって解決され、絶縁ゲート駆動回路の困難は、高速のゲート駆動 IC と超小型絶縁 DC-DC 電源モジュールの市販化によって、解決された。

GaN-HEMT 利用の利点は、ターンオン・オフ速度が高速のためスイッチ開閉タイミングを精密に設定できデッドタイムを確保しやすいこと、オン抵抗の低さ、が挙げられる。いずれも低損失化に貢献する。一方、GaN-HEMT の課題として、耐圧が 650V 程度であるため負荷によっては 2kW 級以上の高出力の達成が難しいことが挙げられる。

4. 単相 D 級ハーフブリッジインバータの大電力化

単相の D 級インバータで大電力を実現するために、筆者は、GaN-HEMT の大電流対応能力を活かして高出力を得る回路設計手法を研究し報告した⁽⁴⁾。これは、インピーダンス変換によって負荷抵抗値の制約を受けずに大電流を引き出す手法である。低電圧においても所望の大電力を得る設計が可能である。提案インバータは、GaN-HEMT の耐圧の課題を回避し、13.56MHz において 2.8kW 級の高出力を達成した⁽⁵⁾。

本発表では、E 級インバータと提案 D 級インバータをそれぞれ 13.56MHz 電界共鳴 WPT に接続し、測定した動作波形を比較し、提案 D 級インバータの堅牢性を示す。

文 献

- (1) N.O. Sokal, et al.: IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 10, No. 3, pp. 168-176, 1975.
- (2) J. Choi, et al.: in Proc. IEEE Wireless Power Transfer Conf., pp. 1-4, 2015.
- (3) S. A. El-Hamamsy: IEEE Trans. Power Electron., Vol. 9, No. 3, pp. 297-308, 1994.
- (4) A. Oyane, et al.: IEICE Trans. Electron., Vol. E105-C, No. 9, pp. 407-418, 2022.
- (5) 大矢根 他：電気学会産業応用部門大会、No. 1-35, 2021.