

1. 第4世代ビークルの研究

未来ビークルシティリサーチセンター 特任教授 大平 孝, 電気・電子情報工学系
教授 田村 昌也, 機械工学系 助教 堀尾 亮介, 未来ビークルシティリサーチセ
ンター 特任助手 水谷 豊

1-1 非ユークリッド幾何学を活用した共振型スイッチングRF増幅器の設計法の体系化

20世紀初頭以来, RF増幅器は放送や通信用の送信機で長い間使用されてきた。RF増幅器の回路トポロジの進化は, A級から始まり, B級を経て, より高い電力変換効率を追求するためにC級が発明された。21世紀には, ワイヤレス電力伝送(WPT)等大電力出力かつ高効率が要求されるアプリケーションが登場し, A級, B級, C級の性能を上回る技術として, スwitchング動作を利用したD級, E級, F級増幅へと進化を遂げた。

D級はパルス幅変調オーディオアンプで主に使用される。複数の高調波をもたらす矩形波電圧を出力するため, WPTには適さない場合がある。この問題に対し, E級およびF級が発明された。これらは, トランジスタによって生成された高調波を集中定数または分布定数の共振素子によるフィルタで除去する。さらに共振フィルタを用いた増幅器は, ゼロ電圧スイッチング(ZVS)技術によって理論効率100%を達成する。しかしながら, ZVS動作は, 特定の負荷抵抗値に対してのみ達成し, 適正な抵抗値に正確に調整されていないと, 効率が大幅に低下する。

本研究は, 広範囲の負荷抵抗値に対してZVS動作を維持できる電力増幅器(非負荷依存型電力増幅器)の体系的な設計理論を確立する。重要な点は, ZVS動作を維持できる負荷抵抗の軌跡が直交座標 R - X 平面およびスミスチャートに描かれ, その軌跡は双曲幾何学上の測地線とみなせることである。加えて測地線軌跡がZVS条件を正確に満たす別の測地線に変換することを電気回路上のインピーダンス変換技術で達成できる点にある。非ユークリッド幾何学で知られている測地線をインピーダンス変換に活用したG2G理論を構築した。これにより, 理論上全負荷抵抗範囲にわたってZVSを実現し, さらにRF出力電圧または電流を一定の振幅に維持する。本研究は非負荷依存型電力増幅器の回路トポロジを包括的に導出し, 各トポロジにおける設計理論を確立した。設計理論の妥当性をシミュレーションと実機実験によって検証し, 傾向がよく一致することを確認した。

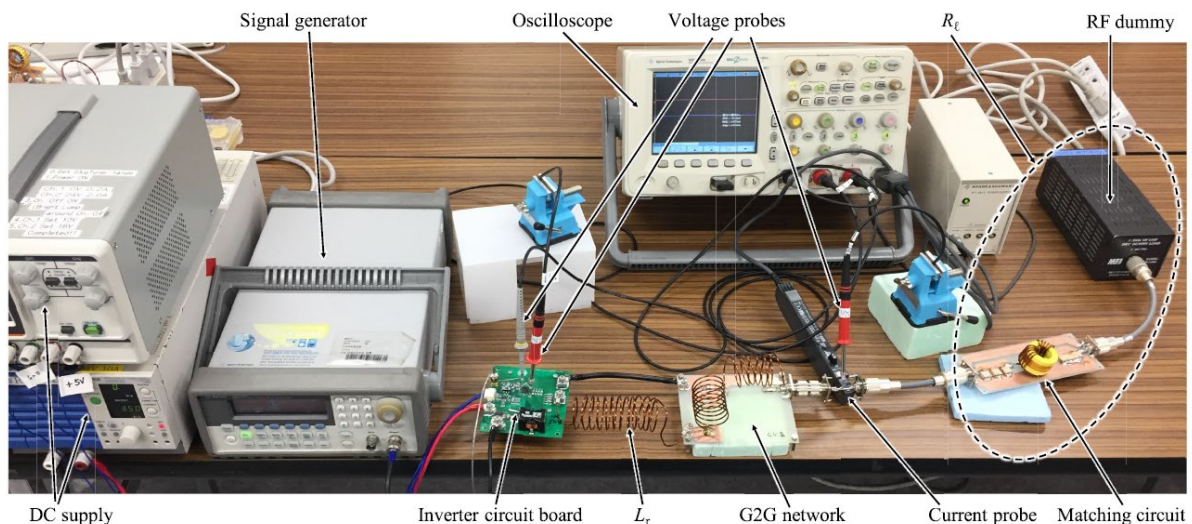


図 1-1-1 設計試作した RF 増幅器の実験風景

1-2 電力伝送系における一般化 kQ 理論の構築

米国 MIT が 2007 年に実施したワイヤレス電力伝送実験で用いられた kQ 理論を任意の受動相反 2 ポート系に適用できるように一般化拡張した。出発点として図 1-2-1 に示すエネルギー状態を提案した。これより kQ を伝達エネルギーと損失エネルギーの比と考えて、入出力電力ベースの表現式

$$kQ = \frac{2\sqrt{P_1 P_2}}{P_1 - P_2}$$

を導出した。次に、図 1-2-2 に示す 2 ポート網のインピーダンス行列

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix}$$

に着目し、行列要素を用いた kQ 式表現

$$kQ = \frac{|Z_{21}|}{\sqrt{\Delta}}$$

を導出した。ここで、伝達インピーダンスの絶対値

$$|Z_{21}| = \sqrt{R_{21}^2 + X_{21}^2}$$

および抵抗行列式

$$\Delta = R_{11}R_{22} - R_{12}R_{21}$$

はどちらも上記インピーダンス行列から抽出される物理量である。

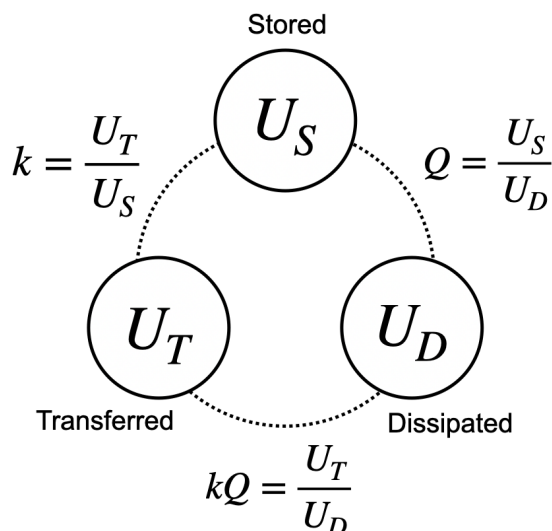


図 1-2-1 エネルギーの 3 状態とそれらの比から定義する 3 つの指標

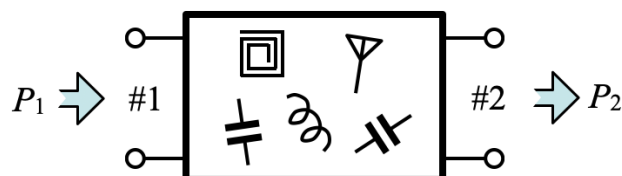


図 1-2-2 受動相反素子から構成される任意の 2 ポート網

ここで導出した kQ 公式は、あらゆる電力伝送系に適用できる。例えば、図 1-2-3 に示す伝送線路に適用すると

$$kQ = \frac{1}{\sinh \alpha l}$$

となる。また、図 1-2-4 に示す 3 次元自由空間電波伝搬に適用すると

$$kQ = \frac{\lambda}{2\pi d}$$

となる。以上の公式はいずれも数学的に極めてエレガントであり、今後の高周波工学の教科書に載るべき基礎的かつ歴史的知見である。

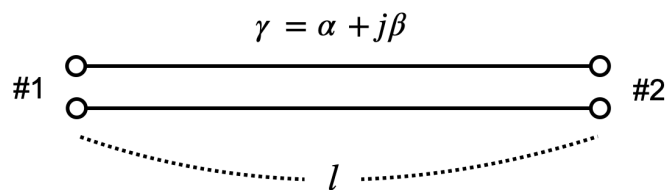


図 1-2-3 損失のある伝送線路

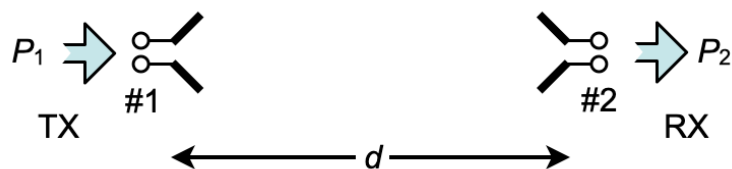


図 1-2-4 3次元自由空間に対向配置された2つのアンテナ

1-3 移動体発電と無線給電技術を利用したエネルギー回収の実験的研究

鶴岡工業高等専門学校の遠藤助教と連携し、移動体の回生エネルギーにより発電した電力を無線で電力網に送電する技術の開発を目的として研究を実施するとともに、電界結合方式の無線給電技術を高専の研究へ普及させることを目指す。回生エネルギーを利用した発電は EV などの充電に用いられているが、EV 内部の電力網という閉じた系の中だけで使用されてきた。電界結合方式の無線給電技術はこのような移動体発電による電力を電力網に送電する技術として有効であり、遠藤助教の研究成果である空中風力発電装置からの電力を地上に固定された負荷に送電することを目指す。

今年度は鶴岡高専と共同で送受電電極を介した電力の伝送の実験を実施した。送受電電極及び伝送線路の特性インピーダンスを測定し、送電側ポートの整合を確認した。電力伝送実験では移動体を模した台車側に電源を設置、入力電力 8W にて地上側の負荷へ送電し RF-RF 効率 54% を達成した。

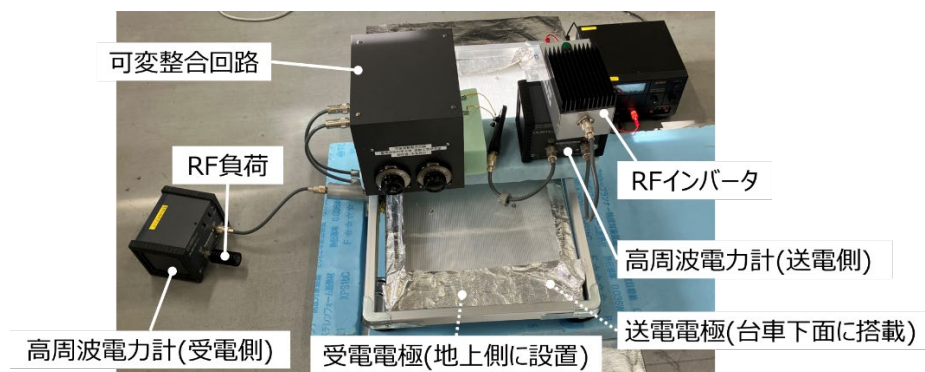


図 1-3-1 設計試作した RF 増幅器の実験風景

1-4 スマートファクトリー向けワイヤレス電力伝送システムの開発

世界中で導入が進められているスマートファクトリーにより、品質データの収集による品質向上、生産計画や製造の最適化によるコスト削減、過酷な作業環境での安全管理など大きな効果が期待されている。一方で、製造装置やセンサなどはまだ有線給電や人手による電池交換などが行われている。このような課題に対しワイヤレス電力伝送（WPT）を導入できれば、データ管理から電力供給まですべてデジタル化でき、作業効率・生産性の向上と、作業者の負担軽減・安全性確保による働き方改革を両立する社会が創造できる。そこで、スマートファクトリー向けワイヤレス電力伝送技術として、産業用ロボット向けおよび工場内センサ向けの WPT の基礎技術開発を実施している。

（１）産業用ロボット向け WPT システムの開発

工場に広く導入されている多関節ロボットは関節の屈曲・伸展・旋回動作による配線ケーブルの断線を回避するため、スリッピングを介して電力供給を行っている。しかし、接触型のため摩耗により耐久性がすぐに低下してしまう。そこで、単純・軽量構造かつメンテナンス性も優良で低漏洩電磁界のため、安価に製造できる点が魅力である電界方式非接触電力伝送により解決を図った。

結果、ハンドの回転動作に対応した 3 次元送受電器と、ハンドの回転や開閉動作によるインピーダンス変化に対応した WPT システムを業界で初めて開発し、作業用ロボットのハンドへ 13.56MHz・12W・24V 給電を達成できた。

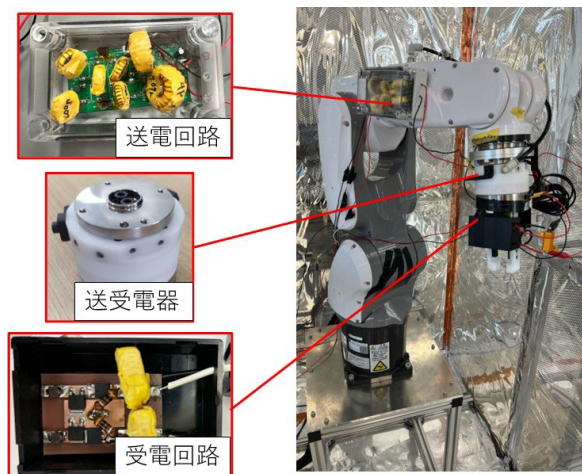


図 1-4-1 開発した電界型 WPT システムを搭載したロボットアーム

（２）工場内センサ向け WPT システムの開発

工場内の製造ラインは安全防護柵で囲われており、工程やロボットの動作管理ため複数のセンサが配置されている。センサには有線かバッテリーで駆動電力が供給される。有線の場合、ラインやロボットの動作に影響がないように引き回されており、配線の煩雑化が問題となる。バッテリーの場合は、交換のためにラインを止めて人手で一つずつ交換する煩雑な作業が問題となる。そこで、安全防護柵内に閉じ込めた電磁波の定在波を利用して見通し内外関係なく高効率に給電できる点が魅力である独自方式の非接触電力伝送により解決を図った。

結果、安全防護柵内の任意の場所に配置し、無線給電でセンサの駆動に成功した。また、センシングされた情報は安全防護柵の外側で受信できた。さらに、400 MHz 帯 1W 送電で 4mAh のバッテリーを充電し、Bluetooth モジュールの駆動も成功した。



図 1-4-2 開発した工場内センサ向け WPT システム