

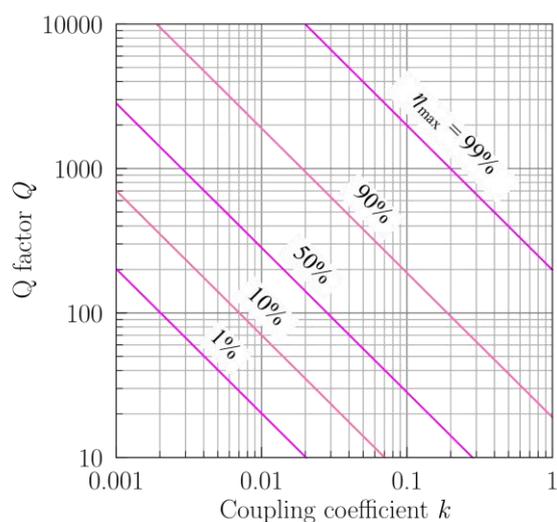
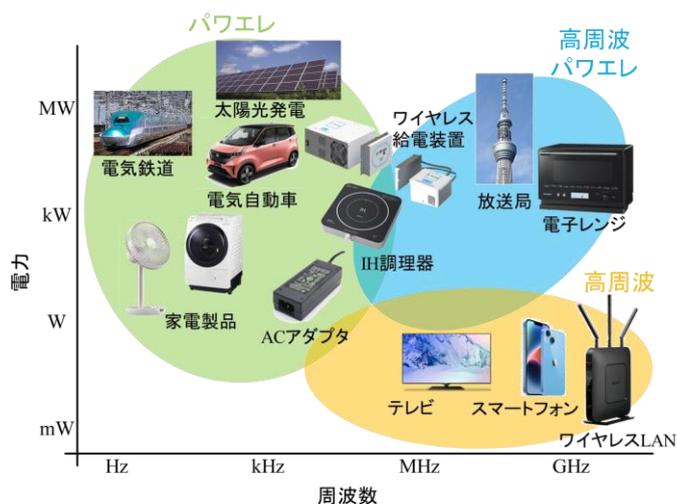
未来を拓く高周波パワエレ ーワイヤレス給電に向けた挑戦ー

Radio-Frequency Power Electronics Paving the Way to the Future ーChallenges for Wireless Power Transferー

水谷 豊[†]Minoru MIZUTANI[†][†]豊橋技術科学大学 未来ビークルシティリサーチセンター

概要

高周波技術とパワーエレクトロニクス技術を融合することで「高周波パワエレ」と呼ぶ新たな技術分野が誕生する。これら2つの技術を融合するにはどちらか片方の知識だけでは不十分である。そこで本講演では高周波パワエレの定義を述べ、これらの根幹をなす技術を説明する。次に高周波パワエレのキラーアプリケーションであるワイヤレス給電（WPT: Wireless Power Transfer）の需要と動向を述べる。そして、WPTの基本構成と必須コンポーネントである高周波インバータ、ワイヤレス結合器、整合回路、高周波整流回路を紹介するとともにそれらの設計理論である双曲幾何学、 kQ 積、最適インピーダンスの公式を論じる。最後にWPTの開発例と将来展望を紹介する。

ワイヤレス結合器の kQ 積による効率早見表

電気機器の電力と周波数

Abstract

Radio Frequency (RF) technology and Power Electronics merges into a new technical field, which should be called “RF power electronics.” To effectively merge these technologies, it is insufficient to know about either one of them. This lecture presents how to define the RF power electronics, and their underlying technologies. Then, we introduce wireless power transfer (WPT) as the killer application of RF power electronics. Next, we describe basic topology of WPT and its indispensable components, i.e., RF inverter, wireless coupler, impedance matching network, and RF rectifier. We also touch on hyperbolic geometry, kQ product, and optimum impedance formulas as the basic design theory of WPT systems. We finally overview prototype examples and future vision of WPT.

1. 高周波パワエレとは？

高周波 (RF: Radio Frequency) とは、概ね MHz 以上の周波数を扱う技術である。世の中にある製品としてはスマートフォン、ワイヤレス LAN、テレビなどの放送機器や通信機器がある。高周波を扱う上で必要な技術は高周波回路、高周波半導体、アンテナ、電磁波工学などが挙げられる。

一方、パワーエレクトロニクス (パワエレ) とは概ね数 10W 以上の電力変換を扱う技術である。世の中にある製品としては AC アダプタ、家電製品、電気自動車、電気鉄道、太陽光発電などの電力機器がある。パワエレを扱う上で必要な技術は電気工学、電子工学、制御工学、放熱工学などが挙げられる。

上記の 2 つの技術分野を合わせ持つ領域を高周波パワエレと呼ぶ。高周波パワエレの製品は IH 調理器、電子レンジ、ラジオ放送局、ワイヤレス給電機器などが挙げられる。それぞれの分野の電力と周波数と製品例を図 1 に示す。

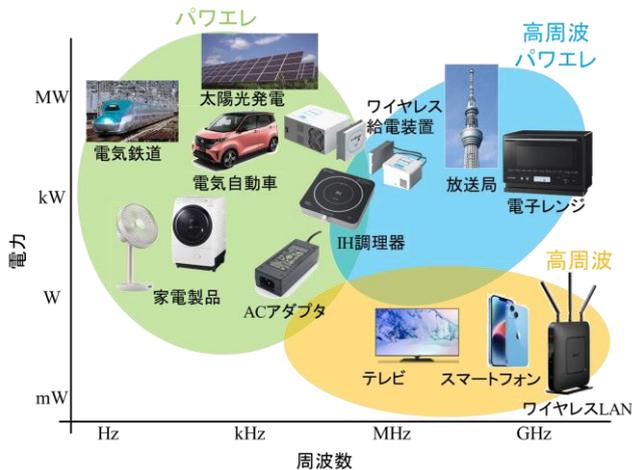


図 1 電力と周波数

2. ワイヤレス給電の需要と動向

ワイヤレス給電技術は 20 世紀後半から急速に発展し、製品としては電動歯ブラシや電動シェーバーの置くだけ充電から普及が始まった。当時は数 kHz で数 W 程度のワイヤレス給電であった。21 世紀に入り、大電力機器へのワイヤレス給電の要望が高まってきた。例えば、スマートフォン、ウェアラブル機器、パソコン、マイクロモビリティ、電気自動車へのワイヤレス給電の研究開発が活発になってきた。大電力化だけでなく小型化の需要にも応えるため、周波数を高めるトレンドが上昇してきた。大電力で高周波を達成するには、SiC や GaN といったワイドバンドギャップ半導体デバイスの活用と高周波でも高効率率が実現できる設計理論の構築が必要である。

3. システム構成

ワイヤレス給電システムの構成ブロックを図 2 に示す。RF インバータは DC 電源から入力された DC 電力を高周波に変換する。ワイヤレス結合器は電界型と磁界型が存在し、その役割は空間または絶縁体を介し高周波電力を伝搬する。RF 整流回路は伝搬された高周波電力を DC 電力へ変換し、負荷へ供給する。ワイヤレス結合器の両端にある整合回路は高周波電力を効率よく伝搬させるための役割を担う。上記それぞれのコンポーネントについて理解を深めることで、高周波パワエレ技術の深淵に触れることができる[1]。

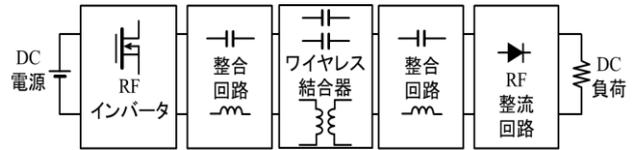


図 2 ワイヤレス給電システムブロック

4. RF インバータ

4.1. RF インバータの種類

高効率でよく用いられる RF インバータに D 級、E 級、F 級トポロジがある。それぞれの回路図を図 3 に示す[1]。

D 級インバータはスイッチングデバイスを 2 個直列に使用する。主に kHz 帯で動作し、デバイスとしてはシリコンの MOSFET や IGBT などが使われる。2 個のスイッチングデバイスは交互に ON/OFF を繰り返すようにゲート駆動させる。その結果、ゲートのスイッチング周波数と同じ周波数の矩形波電圧が出力される。D 級インバータは出力波形が矩形波すなわち高調波ひずみ成分を多く含んでいるため、そのまま WPT に使用すると電波環境的に好ましくない。そこで出力ポートに高調波を抑圧するローパスフィルタを接続して使用する。

E 級インバータ[2]は 1 個のスイッチングデバイスと LC 素子で構成される。スイッチングデバイスがスイッチング動作するにもかかわらず、出力は正弦波となる。E 級インバータはゼロ電圧スイッチング (ZVS : Zero-voltage switching) 条件およびゼロ電圧勾配スイッチング (ZVDS : Zero-voltage-derivative switching) 条件を同時に満たすように設計することでターンオン損失をゼロにし、高効率を達成する。主に数百〜数 kW クラスかつ MHz 帯で動作し、デバイスとしては高速応答性に優れた SiC や GaN といったワイドバンドギャップ半導体が適している。つまり高周波パワエレにおいて E 級インバータはキーテクノロジーとなる。E 級インバータの詳しい動作について次節で解説する。

F 級インバータは 1 個のスイッチングデバイスと伝送線路とスタブで構成される。スイッチングデバイスから見た負荷が偶数倍波において短絡、奇数倍波において開放と見えるように回路トポロジを工夫する。これによりドレイン波形はゼロ電流スイッチング (ZCS : Zero-current switching) となり、スイッチングロスが限りなくゼロに近づくことで高効率を達成する。F 級インバータも出力は E 級と同じく正弦波となる。主に数 W クラスまでの GHz 帯で使われることが多い。

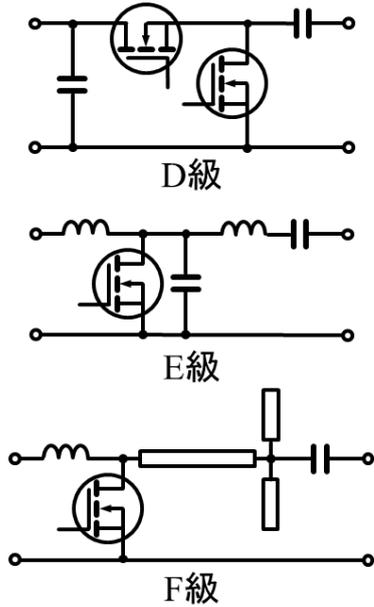


図 3 RF インバータの種類

4.2. E 級インバータ

E 級インバータの回路図を図 4 に示す。E 級インバータはチョークコイル L_1 、スイッチングデバイス、シャントキャパシタ C_1 、直列フィルタ C_2 、 L_2 で構成される。

回路動作を簡単に説明する。DC 電源から入力された電力はチョークコイル L_1 を通り、スイッチングデバイスが周期的にオンオフすることにより高周波電力に変換される。スイッチングデバイスにより変換された高周波電力は直列フィルタ C_2 、 L_2 を通過し、スイッチング周波数 (基本波周波数) の電圧および電流として負荷に供給される。

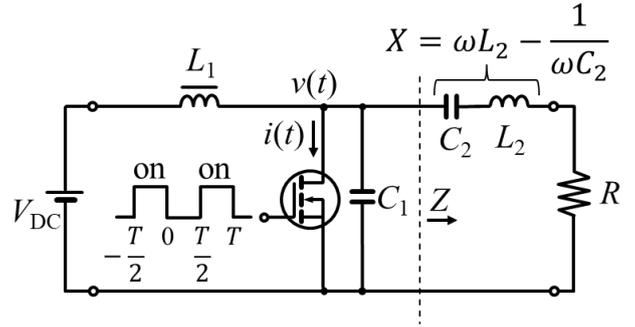


図 4 E 級インバータの回路図

ターンオフ時にシャントキャパシタ C_1 に電流が流れはじめ、充電が始まる。このときスイッチングデバイスのドレイン電圧が ZVS を達成する。一方、ターンオン時にシャントキャパシタの電荷および電流がゼロになることでスイッチングデバイスのドレイン電圧が ZVS、ZVDS を同時に達成する。このときドレイン電流は ZCS も達成する。スイッチングデバイスの電圧、電流波形を図 5 に示す。

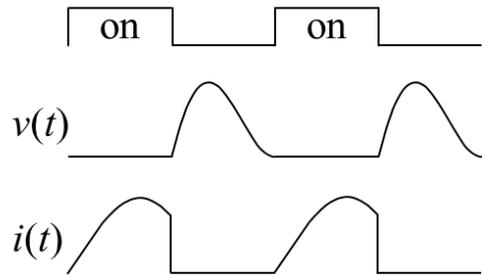


図 5 E 級インバータのドレイン電圧・電流波形

E 級インバータの動作は負荷インピーダンスによって変動することがわかっている。その詳細はハーマニク原理で解析することができる[2]。E 級動作と呼ばれる ZVS、ZVDS を達成する負荷インピーダンスを図形で簡単に説明する。図 4 の C_1 から負荷側を見たインピーダンスを $Z = R + jX$ と定義する。これに $\hat{\cdot}$ をつけた $\hat{Z} = \hat{R} + j\hat{X}$ を正規化インピーダンスと呼ぶ。 $\hat{\cdot}$ をつけたパラメータは $\hat{R} = \omega C_1 R$ 、 $\hat{X} = \omega C_1 X$ である。なお、角周波数 $\omega = 2\pi f$ である。文献[2]より ZVS を満たす負荷インピーダンスは

$$\hat{R}^2 + \left(\hat{X} + \frac{2}{\pi^2} - \frac{1}{2} \right)^2 = \left(\frac{2}{\pi^2} \right)^2 \quad (1)$$

となる。加えて、ZVDS を満たす負荷インピーダンスは

$$\hat{R}^2 + (\hat{X} - 1)^2 = \frac{4}{\pi^2} + \frac{1}{4} \quad (2)$$

となる。式(1), (2)の ZVS および ZVDS の負荷インピーダンスの軌跡を図 6 に示す。2 つの軌跡は双曲幾何

学の測地線と同じ特性を持つため、ZVS 測地線、ZVDS 測地線と呼ぶ。2 つの測地線の交点、つまり ZVS と ZVDS を同時に達成する負荷インピーダンスを

$$\hat{Z}_0 = \hat{R}_0 + j\hat{X}_0 = \frac{8}{\pi(\pi^2+4)} + j\frac{\pi^2-4}{2(\pi^2+4)} \quad (3)$$

と表す。この負荷インピーダンスのとき、E 級インバータは図 5 示す E 級動作の波形を達成する。

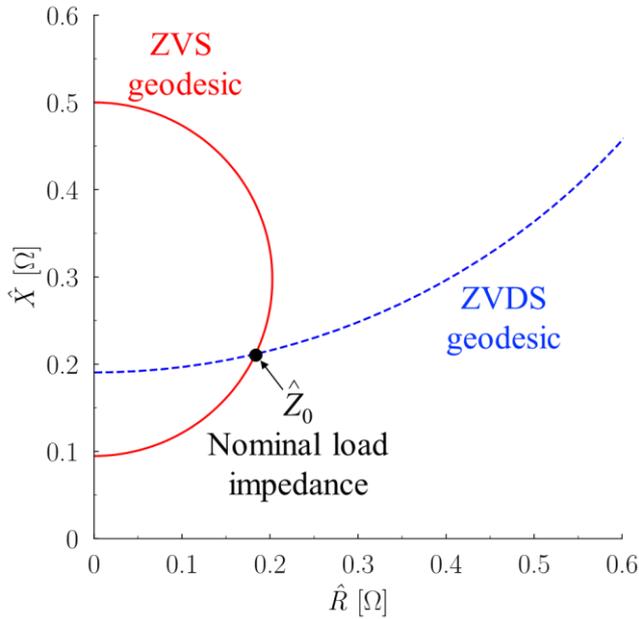


図 6 負荷インピーダンス軌跡

一方、出力インピーダンスがわかれば負荷が変動した時の E 級インバータの出力電圧、電流の変化を知ることができる。ここで、E 級インバータの出力インピーダンスはいったい何 Ω なのかという疑問が生じる。スイッチングモードで動くため、 0Ω なのか $\infty \Omega$ なのか、はたまた有限の値となるのであろうか。その答えは文献[2]に示されている。ここでは簡単に、図を用いて説明する。図 4 の負荷 R の値を変化させていったときの RF 出力電圧と RF 出力電流の軌跡を描いたものが図 7 である。図 7 中の縦軸、横軸の電圧、電流は

$$I_{RF} = \left(1 + \frac{\pi^2}{4}\right) I_{RF0} = 3.47 I_{RF0} \quad (4)$$

$$V_{RF} = \left(1 + \frac{4}{\pi^2}\right) V_{RF0} = 1.41 V_{RF0} \quad (5)$$

で表される。式(4)は負荷を 0Ω 、式(5)は負荷を $\infty \Omega$ にした振幅値である。なお、ZVS と ZVDS 同時動作時の RF 出力電流振幅と RF 電圧振幅を

$$I_{RF0} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\pi^2 + 4} \omega C_1 V_{DC} \quad (6)$$

$$V_{RF0} = \frac{4}{\sqrt{\pi^2+4}} \omega C_1 V_{DC} \quad (7)$$

と表す。式(4)、(5)より出力インピーダンスは

$$Z_{out} = -\frac{dV_{RF}}{dI_{RF}} = \frac{4}{\pi^2} R_0 = 0.405 R_0 \quad (8)$$

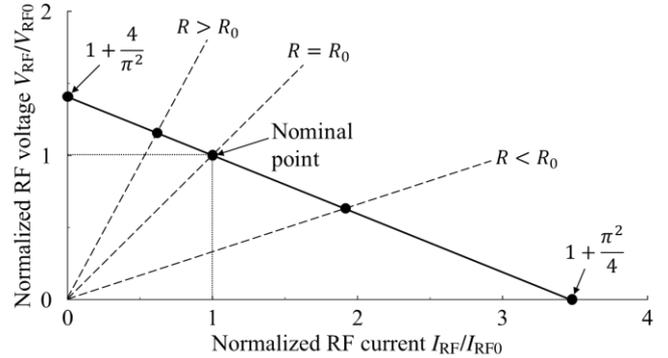


図 7 E 級インバータの出力インピーダンスとなる。この結果より E 級インバータはスイッチングモードで動作しているにもかかわらず、出力インピーダンスは有限値であることがわかる。

5. ワイヤレス結合器

5.1. ワイヤレス結合器の種類

WPT システムを構成する上で最も特徴的なコンポーネントがワイヤレス結合器である。ワイヤレス結合器は空間を介して高周波電力を伝搬する役割を担う。ワイヤレス給電における代表的な非放射型のワイヤレス結合器を表 1 に示す。

表 1 非放射型のワイヤレス結合器

	構造	等価回路
磁界結合		
電界結合		

5.2. ワイヤレス結合器の効率

ワイヤレス結合器を設計する上で効率は特に重要な指標となる。構造を検討する段階で物理パラメータを様々の形状に変更し効率性能がどのように変化

するか調べ、設計に落とし込むことが多い。そのときに役立つ公式が

$$\eta_{\max} = \frac{\sqrt{1+(kQ)^2}-1}{\sqrt{1+(kQ)^2}+1} \quad (9)$$

である[3]。 η_{\max} はワイヤレス結合器の最大効率を表す。式(9)よりワイヤレス結合器の最大効率は結合係数 k と Q ファクタの積である kQ 積に支配される。 k と Q 、そして η_{\max} の関係を表した効率早見表を図8に示す[4]。例えば、 $k=0.1$ のときに $\eta_{\max} = 90\%$ を達成しようとするとき $Q=200$ 程度必要であることが読み取れる。次節から磁界結合器、電界結合器、その両方を含む任意形状に対応した統一理論について説明する。

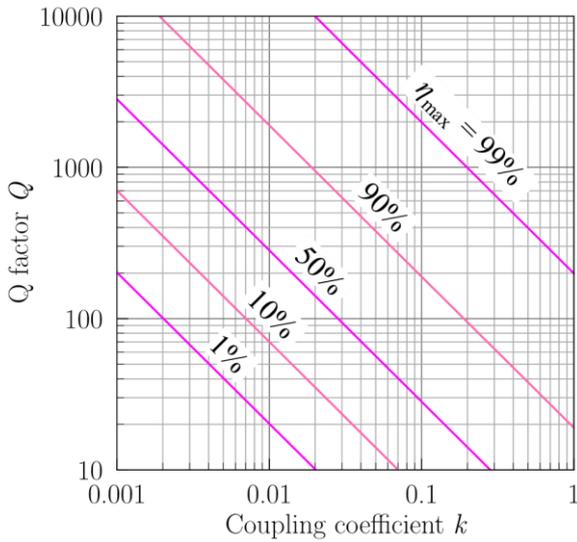


図8 ワイヤレス結合器の kQ 積による効率早見表

5.2.1. 磁界結合器

磁界結合器は2つのコイルで構成されている。2つのコイルを互いに隣接して配置すると、それらの間に磁力線による結合が生じる。一方のコイルから発生した全磁力線のうち、他方のコイルに届く割合を結合係数と呼び、記号 k で表す。表1の回路パラメータでは

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (10)$$

と表される。

一方、コイル単体の性能の良さを表す指標として Q ファクタがある。 Q ファクタは自己インダクタンス L_1 、 L_2 と巻線抵抗 R_1 、 R_2 を使って、

$$Q_1 = \frac{\omega L_1}{R_1}, \quad Q_2 = \frac{\omega L_2}{R_2}, \quad Q = \sqrt{Q_1 Q_2} \quad (11)$$

と表される。磁界結合器の kQ 積は

$$kQ = \frac{\omega M}{\sqrt{R_1 R_2}} \quad (12)$$

となる。式(12)を式(9)に代入すると磁界結合器の効率を算出することができる。

5.2.2. 電界結合器

磁界結合器の双対定理を考えることで電界結合器に置き換えることができる。つまり、前節のコイルを導体板に置き換える。物理的なパラメータは電流⇔電圧、磁力線⇔電気力線、抵抗⇔コンダクタンス、インダクタンス⇔キャパシタンスと置き換えることで、結合係数、 Q ファクタは

$$k = \frac{C_c}{\sqrt{(C_1+C_c)(C_2+C_c)}} \quad (13)$$

$$Q_1 = \frac{\omega(C_1+C_c)}{G_1}, \quad Q_2 = \frac{\omega(C_2+C_c)}{G_2}, \quad Q = \sqrt{Q_1 Q_2} \quad (14)$$

と表される。

効率の指標となる kQ 積は

$$kQ = \frac{\omega C_c}{\sqrt{G_1 G_2}} \quad (15)$$

となる。

5.2.3. 統一理論式

磁界結合器および電界結合器はシンプルなLCR回路で表現できた。しかしながら、高周波になると分布定数線路や立体平面構造が含まれることも多い。さらにはアンテナ間のように様々な箇所での結合が生じ、等価回路で表現することが困難になる。そこで2ポート回路パラメータのブラックボックスから kQ 積が計算できる統一理論が役に立つ。

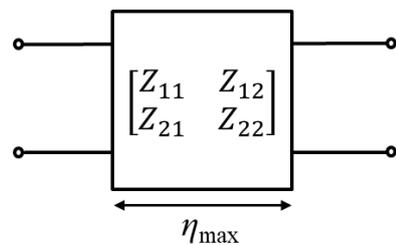


図9 2ポート Z パラメータモデル

図9に示す2ポート Z パラメータは

$$Z_{11} = R_{11} + jX_{11}, \quad Z_{12} = R_{12} + jX_{12},$$

$$Z_{21} = R_{21} + jX_{21}, \quad Z_{22} = R_{22} + jX_{22} \quad (16)$$

で定義される。ここで媒介変数

$$\Delta = R_{11}R_{22} - R_{12}R_{21} \quad (17)$$

を導入する。これにより kQ 積は

$$kQ = \frac{|Z_{21}|}{\sqrt{\Delta}} \quad (18)$$

と表すことができる[3]。これにより、電磁界シミュレーションや測定で得られた Z パラメータから最大効率を簡単に算出することができる。本統一理論はワイヤレス結合器の設計や測定時に絶大な効果を発

揮する。

6. 整合回路

ワイヤレス結合器の両端に接続される整合回路は WPT システムの効率性能を引き上げる有効な手段である。ワイヤレス結合器の入力ポートと RF インバータ、出力ポートと RF 整流回路と整合をとるように設計をする。整合回路はインダクタおよびコンデンサで構成される。本章では最適インピーダンスと整合回路自体の最大効率について説明する。

6.1. 最適インピーダンス

ワイヤレス結合器の最適インピーダンスを知ることによってその両端に接続される整合回路を設計できる。最適インピーダンスは Z パラメータを用いて算出できる。具体的には媒介変数

$$\Sigma = R_{11}R_{22} + X_{12}X_{21} \quad (19)$$

と式(17)を導入し、最適インピーダンスを

$$Z_s = R_s + jX_s = \frac{\sqrt{\Sigma\Delta}}{R_{11}} + j\left(X_{22} - \frac{R_{12}X_{21}}{R_{11}}\right) \quad (20)$$

$$Z_\ell = R_\ell + jX_\ell = \frac{\sqrt{\Sigma\Delta}}{R_{22}} + j\left(X_{11} - \frac{R_{12}X_{21}}{R_{22}}\right) \quad (21)$$

と表すことができる[3]。この最適インピーダンスを満たすことでワイヤレス結合器の効率は最大値である η_{\max} を達成する。

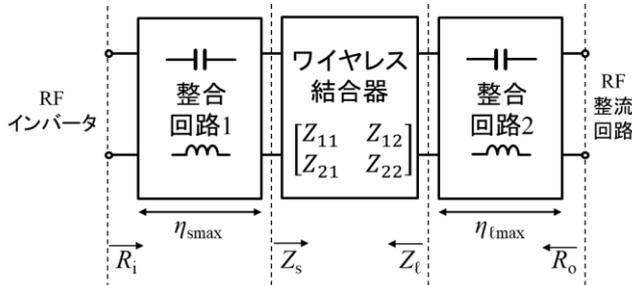


図 10 ワイヤレス結合器の整合回路

6.2. 最大効率

WPT システムにおいてワイヤレス結合器だけでなく、整合回路の効率も WPT システムの性能を左右する。整合回路の最大効率はポアンカレ長を用いて表すことができる。詳しくは文献[5]で報告されている。ポアンカレ長を短くすることで以下の3つの効果を得る。

- ・インピーダンス変換素子（インダクタ、コンデンサ）の電力損失を軽減
 - ・素子の無効電力（電圧・電流ストレス）を軽減
 - ・素子値の誤差や変動に対するロバスト性が向上
- 整合回路に使用するインダクタおよびコンデンサのポアンカレ長を最短にすることで最大効率を達成する。ここでは結果のみを簡単に述べる。前節の最適インピーダンスを用いることで、最短ポアンカレ長を

$$\Lambda_s = \frac{|X_s|}{R_s} \quad (22)$$

$$\Lambda_\ell = \frac{|X_\ell|}{R_\ell} \quad (23)$$

と表すことができる[6]。整合回路の最大効率は

$$\eta_{s\max} = \exp\left(-\frac{\Lambda_s}{\sqrt{1+Q_u^2}}\right) \quad (24)$$

$$\eta_{\ell\max} = \exp\left(-\frac{\Lambda_\ell}{\sqrt{1+Q_u^2}}\right) \quad (24)$$

となる。 Q_u は整合回路に使用するインダクタおよびコンデンサの無負荷 Q 値である。なお、本結果は RF インバータと RF 整流回路のインピーダンスに虚部を含まないことを前提としている。

7. RF 整流回路

7.1. 電力と効率

RF 整流回路はワイヤレス結合器を介して伝搬された高周波電力を直流電力に変換する。伝搬された高周波の基本波電力を無駄なく直流電力に変換することで RF 整流回路の効率が向上する。RF 整流回路に関する電力と効率の関係を図 11 に示す。RF 整流回路は入力された基本波電力を直流電力と高調波電力と熱損失に変換する。直流電力は負荷へ供給され、高調波電力は入力側へ戻り、熱損失は回路内の熱となって消費される。したがって RF 整流回路の効率は

$$\eta_{\text{rec}} = \frac{\text{直流電力}}{\text{基本波電力}} \quad (26)$$

と定義する。

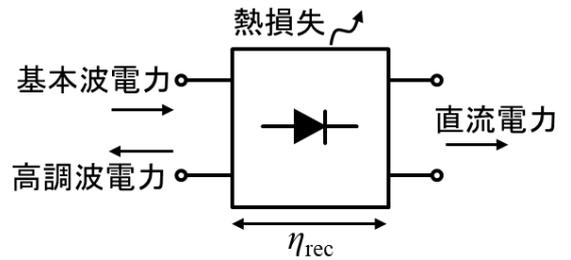


図 11 RF 整流回路に関する電力と効率

7.2. RF 整流回路の基本トポロジ

WPT に使われる RF 整流回路の基本トポロジを図 12 に示す[7]。

最もシンプルなトポロジがシングルシリーズである。左ポートから入力された高周波電力がダイオードで DC に変換されて、右ポートに出力される。RF ポートに付加されているインダクタは DC パスを作るためのチョークコイルである。DC ポートのコンデンサは出力電圧に含まれるリップルを平滑する働きがある。このトポロジは放送通信用の AM 検波器としても広く使用されている。

シングルシリーズの双対がシングルシャントであ

る。双対とは直列⇔並列、インダクタ⇔コンデンサという入れ替えをしても同じ機能が得られる考え方である。シングルシャントは電氣的性能の点でシングルシリーズとほぼ変化はないが、回路図からわかるとおりダイオードの一端が接地されているので実装性と放熱性に優れる。

同じRF入力電力で高いDC出力電圧が要求される場合は、ダイオードを2個使って倍電圧型を構成する。得られるDC出力電圧が高くなる一方、取り出せるDC電流は小さくなります。したがって、DC負荷抵抗値が高い場合に適している。また、構成部品がダイオードとコンデンサだけであり、インダクタが不要なので小型化に向いている。

倍電圧型の双対トポロジが倍電流型である。出力電圧は低くても電流駆動能力が高いので低抵抗のDC負荷に適している。

ダイオードを4個を使用したトポロジをブリッジ型である。出力ポートにコンデンサを装荷した構成をブリッジC、インダクタを接続した構成をブリッジLと呼ぶ。

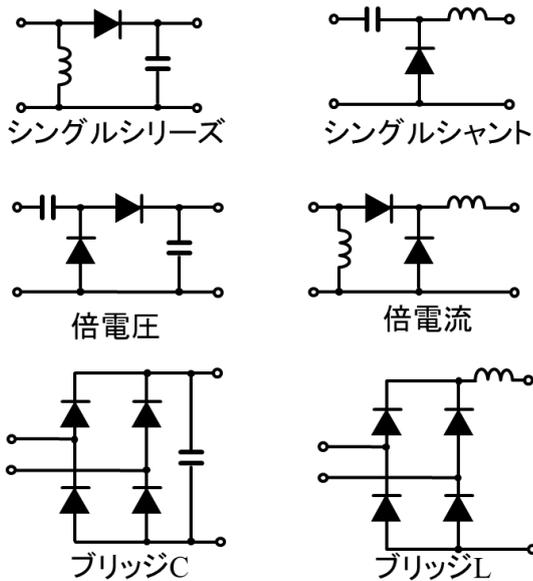


図 12 整流回路の基本トポロジ

それぞれのトポロジのRF入力インピーダンス、DC最適負荷、理論効率を表2に示す。倍電圧型、倍電流型、ブリッジ型はダイオードがバランス動作をするため、偶数次の高調波がキャンセルされる。その結果、入力に戻る高調波電力と出力リップルが低減されるとともに、理論効率がシングル型に比べて約11ポイント向上する。

表 2 整流回路のインピーダンスと理論効率

トポロジ	RF入力インピーダンス (DC負荷50Ω時)	DC最適負荷 (RF50Ω入力時)	理論効率
シリーズ	50 Ω	50 Ω	81.1 %
シャント	50 Ω	50 Ω	
倍電圧	9 Ω	269 Ω	92.3 %
倍電流	269 Ω	9 Ω	
ブリッジC	37 Ω	67 Ω	
ブリッジL	67 Ω	37 Ω	

7.3. E級、逆E級整流回路

さらに効率を高めるために生み出されたトポロジが図15に示すE級、逆E級整流回路[8][9]である。E級トポロジはダイオードに並列にシャントキャパシタが、入力に直列LC共振器が装荷されている。直列LC共振器は基本波電力を通し、高調波電力はリアクティブ反射させるフィルタの役割をしている。この働きにより、入力側に戻る高調波電力が無くなり、効率向上につながり、理論効率は100%を達成する。上記の回路的工夫を高調波処理と呼ぶ。文献[8]にてE級整流回路について詳しく解説されている。

逆E級整流回路はE級整流回路の双対トポロジとなる[9]。入力に並列LC共振器が装荷されることとダイオードに直列に有限のインダクタが接続される。回路理論上はE級と性能はほぼ変わらないが、高周波になるとダイオードのジャンクション容量が無視できないことがあり、実装上はE級トポロジの方が適していることが多い。

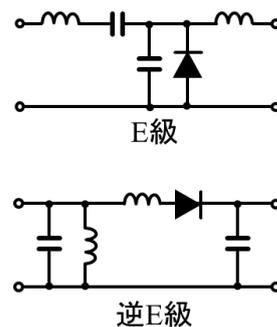


図 13 高調波処理を施した整流回路トポロジ

8. ワイヤレス給電システムの開発例

ワイヤレス給電システムの開発例を図16に示す。

磁界結合の開発例は電動歯ブラシ等の数Wクラスの製品から始まり、Qiの置くだけ充電がスマートフォン等の身近な製品に用いられている。電力が数10W、数100Wクラスになると電動自転車[10]、超小型EV[11]等の駐車時への自動充電が実証実験で報告されている。さらに電力が数kWク

ラスになると電動フォークリフト[12]などの工場で使用される電動車両への応用も実用化されている。10 kW を超える電気自動車[13]に対しては実証実験が試みられている段階である。

電界結合の開発例は、数 W クラスの模型自動車[14]からスタートし、数 10W クラスでは回転体・リニア型の試作機[15][16]が報告されている。工場内搬送機[17]に対しては数 100W クラスの給電が実用化されている。数 kW クラスになると遊園地用のゴーカート[18]への応用例が報告されている。電力が 10 kW を超える電気自動車[19]での実証例も報告されている。

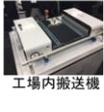
電力	磁界	電界
10 kW	 EV	 EV
1 kW	 フォークリフト	 ゴーカート
100 W	 超小型EV	 工場内搬送機
10 W	 電動自転車	 電界結合試作機
1 W	 スマートフォン	 回転体・リニア型電界結合
	 電動歯ブラシ	 ミニ四駆

図 14 ワイヤレス給電システムの開発例

9. 将来展望

WPT の将来ビジョンを図 17 に示す。横軸が電力、縦軸は実装する環境である。大電力化をするにはパワー半導体の発展、高周波回路技術の構築、EMC 対策技術の向上が必須である。また、私有施設から公共施設へ実装範囲を広げていくには安全性技術、規格標準化、インフラ整備が必要となる。そして、これら両方を達成することにより高速道路への走行中ワイヤレス給電の社会実装が期待できる。

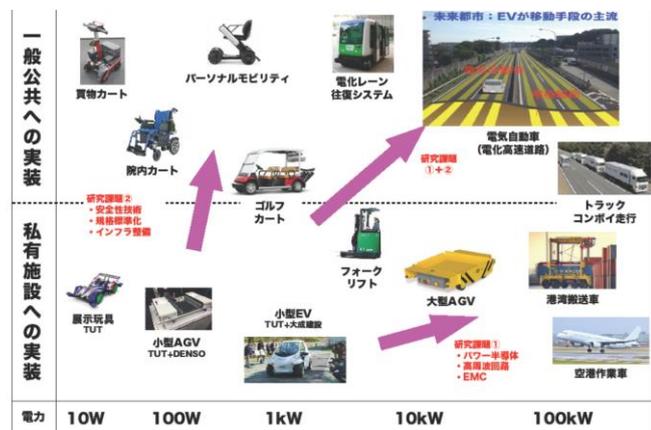


図 15 WPT の将来ビジョン

文 献

- [1] 大平 孝, “ワイヤレス電力伝送の基礎,” RF ワールド, no.43, pp.17-29, Aug. 2018.
- [2] 水谷 豊, 大平 孝, “E 級電力増幅器の出力インピーダンスに関する実験的考察,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J105-C, no.1, pp.37-45, Jan. 2022.
- [3] T. Ohira, “Power transfer theory on linear passive two-port systems (invited),” *IEICE Trans. Electron.*, vol.E101-C, no. 10, pp.719-726, Oct.2018.
- [4] 大平 孝, “最大伝送効率 η_{max} の早見チャート,” RF ワールド, no.50, 折り込み付録, Apr. 2020.
- [5] T. Ohira, “Plane geometry inspires wave engineering starters,” *IEEE Microwave Magazine*, vol. 24, no. 3, pp.93-98, Mar. 2023.
- [6] M. Mizutani, S. Abe, and T. Ohira, “Maximum power transfer efficiency formulas for inductive and capacitive couplers taking Poincaré length of matching circuits into account,” *IEEE Wireless Power Transfer Conf.*, Seoul, Nov.2020.
- [7] T. Ohira, “Power efficiency and optimum load formulas on RF rectifiers featuring flow-angle equations” *IEICE Electronics Express*, ELEX, vol.10, no.11, pp.1-9, Jun. 2013.
- [8] T. Ohira, “Linear algebra elucidates class-E diode rectifiers,” *IEEE Microwave Magazine*, vol.23, no.12, pp.113-122, Dec. 2022.
- [9] 鈴木麻子, “逆 E 級 RF 整流回路の実験,” トランジスタ技術 (掲載予定).
- [10] B & Plus, “ワイヤレス充電機能を標準搭載した電動アシスト自転車パッケージ『Wicha』をリリース!,” <https://www.b-plus-kk.jp/blog/2023/05/21/646>, Aug. 2023.
- [11] DAIHEN, “大阪府とワイヤレス充電システムを用いた超小型 EV の運用実証を開始します,” https://www.daihen.co.jp/newinfo_2021/news_21121602.html, Aug. 2023.
- [12] DAIHEN, “D-Broad,” <https://www.daihen.co.jp/d-broad/>, Aug. 2023.
- [13] DAIHEN, “世界初! EV 向け 11kW 大容量ワイヤレス充電システム “ D-Broad EV ” を商品化,” https://www.daihen.co.jp/newinfo_2017/news_171101.html, Aug. 2023.
- [14] 鈴木良輝, 水谷 豊, 杉浦貴光, 坂井尚貴, 大平 孝, “電化道路をタイヤ集電で走行する電気自動車の 1/32 スケールモデル試作実験,” *電学論 D*, vol.134, no.7, pp.675-682, Jul. 2014.
- [15] B & Plus, “電界結合方式ワイヤレス給電の技術解説,” https://www.b-plus-kk.jp/wireless_1/wireless_2_1/wireless_2_4.html, Aug. 2023.
- [16] Takehiro Imura, Kenta Suzuki, Katsuhiko Hata and Yoichi Hori, “Comparison of Four Resonant Topologies Based on Unified Design Procedure for Capacitive Power Transfer,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, 2021.
- [17] Denso, “D-Depot 簡易自動ロケーションパッケージ,” <https://www.denso-wave.com/ja/robot/event/2017Robot/ja/pdf/24.pdf>, Aug. 2023.
- [18] 水谷 豊, 大平 孝, “遊園地ゴーカート用 1 kW 電界結合 E² 級ワイヤレス充電システム,” 電子情報通信学会論文誌, Vol.J106-C, no.1, pp.10-19, Jan. 2023.
- [19] 鶴谷直樹, 山崎広行, 武脇広和, “走行中給電に向けた MHz 帯電力伝送技術の開発,” *古河電工時報* 第 142 号, pp. 32-35, Feb. 2023.

著者紹介

水谷 豊 豊橋技術科学大学未来ビークルシティリサーチセンター 特任助手, mizutani.minoru.eu@tut.jp