

双対定理でエレガントに設計する 13.56 MHz 帯逆E級RF整流回路の実験

鈴木 麻子 Asako Suzuki

自然界に見る「双対」性を電気回路設計に

私たちの自然界には、電荷のプラスとマイナス、磁石のN極とS極、高気圧と低気圧、酸とアルカリ、動脈と静脈、雄花と雌花、山と海、光と闇、など互いに相手を補い合うように振る舞うペアがあります。これを「双対」と呼びます。

電気回路における双対を表1に示します。回路を構成する要素をすべてその双対で入れ替えることで、元の回路とトポロジは異なるが同じ機能をもつ回路が得られます。これを「双対定理」と呼びます。双対定理はさまざまな回路に適用できます。

高周波パワエレ分野で最近熱い視線を浴びているE級整流 [文献(1)~(3)] にも双対定理が適用できるのでしょうか。本記事では、E級整流回路から出発し、双対定理を使って、逆E級整流回路をエレガントに設計します。設計結果に基づいて試作した逆E級回路(写真1)でRFパワー整流実験を行った結果を報告します。

E級と双対の「逆E級」整流回路の原理

● 原型となるE級整流回路

本記事の本題である逆E級へアプローチする前に、まずはその原型となるE級整流の回路を図1(a)に示します。左側ポートからRF電力を入力するとダイオードでDCへ変換され右側の負荷ポートにDC電力が得られます。

この回路で着眼すべきはダイオードと並列コンデン

サ C_2 です。ダイオードに並列コンデンサを組み合わせると、ダイオードがOFF状態からON状態へ遷移するとき(ターン・オン時)にダイオード電流が不連続に変化します。これを電流ジャンプと呼びます。一方、ダイオードがON状態からOFF状態へ遷移する時(ターン・オフ時)にはダイオード電流がゼロとなります。これを「ゼロ電流スイッチング(ZCS)」と呼びます。

このZCS動作こそがE級整流のエッセンスです。ZCSと初めて聞いたとき、私は一体なんのことがピンときませんでした。でも文献(2)にある高校生のための超~わかりやすい説明を読んで、ガッテンしました。

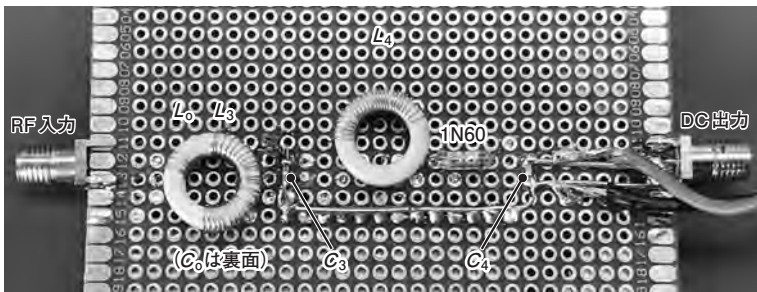
● ON/OFF時の動作が真逆…逆E級への変換

図1(a)に示した回路を4つのブロックに分解し、それぞれのブロックを双対変換します。

こうしてできた回路を図1(b)に示します。これが逆E級整流回路の基本トポロジです。

逆E級で着眼すべきはダイオードと直列コイル L_4 です。一般にダイオードに直列コイルを組み合わせると、ダイオードがターン・オフするときに電圧が不連続に変化します。これを電圧ジャンプと呼びます。逆に、ダイオードがターン・オフするときにはダイオード電圧がゼロとなります。これを「ゼロ電圧スイッチング(ZVS)」と呼びます。このZVS動作が逆E級整流のエッセンスです。

E級と逆E級では動作が真逆となります。ダイオードがON/OFFする際の電圧電流の振る舞いの比較を図2にまとめます。ここでも双対性がみとれます。



◀(写真1) ユニバーサル基板に実装した逆E級整流回路

◀(表1) 電気回路における双対

電圧	⇔	電流
開放	⇔	短絡
直列	⇔	並列
オン(OFF)	⇔	オフ(OFF)
コイル	⇔	コンデンサ
レジスタンス	⇔	コンダクタンス
インピーダンス	⇔	アドミタンス