高周波信号をロスなく伝送するための基本テクニック

これならわかる! インピーダンス・マッチングと分布定数

石井 聡
Satoru Ishii

初めて本物の高周波回路にさわり，増幅器を試作したときのことです．なんでゲインが取れないの？と，悩みました．本来増幅器であるFETが，測定機につないだ際に増幅器として機能していなかったのです．本稿では，その原因であるインピーダンス・マッチングや分布定数などに主眼をおいて解説していきます．

だいたいどの文献や解説でも，数式を展開してインピーダンス・マッチングや分布定数を説明していますが，数学の得意な方以外は理解を進める気力を失ってしまうでしょう．そこで，難しい数式をできるだけ使わずに説明していきます．ぜひ最後までお付き合いください．

インピーダンス・マッチング編

オームの法則と複素数は難しくない

交流回路もやっぱり基本はオームの法則

● 直流では位相を意識しなくてよい

基本中の基本であるオームの法則は，少し大げさかもしれませんが万能です．複素数の概念でもある位相の概念を織り込めば，いくら高い周波数でもこの法則が通用します．オームの法則は，

$$V = IR \quad \cdots\cdots (1)$$

ただし，V：電圧［V］，I：電流［A］，R：抵抗［Ω］

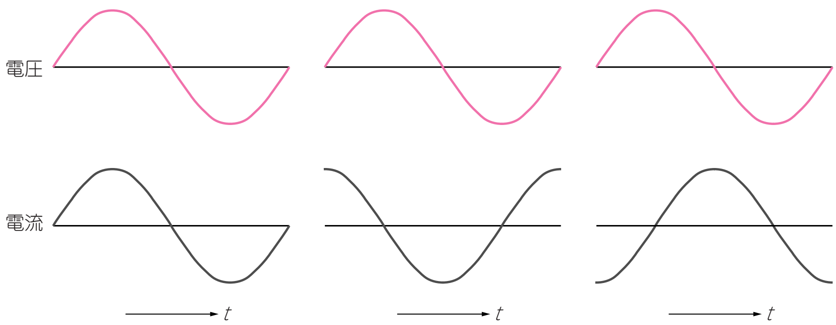
となります．この組み合わせを変えれば電流を求めることも，抵抗を求めることもできます．直流であっても交流であってもこれは通用します．ただ，交流で違うことは周波数と位相という概念が入ることです．

● 交流における電圧と電流の位相差

図1で交流電圧と交流電流の位相差について説明しています．**図1**(**a**)は電圧と電流が同じ位相のようす，**図1**(**b**)は電圧に対して電流が90°進んでいるようす，**図1**(**c**)は電圧に対して電流が90°遅れているようすを表します．交流のときは電圧と電流に位相差が発生します．

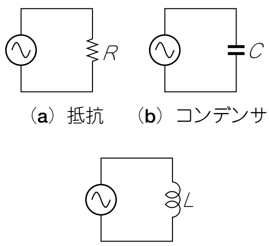
それでは一体，どんなときに電圧と電流に位相差が生じるのでしょうか．**図2**(**a**)は交流電圧源に抵抗 R が接続されていた場合，**図2**(**b**)は同じくコンデンサ C が接続されていた場合，**図2**(**c**)は同じくコイル L が接続されていた場合です．**図1**と**図2**の関係を**表1**にまとめます．

〈図1〉交流電圧と交流電流の位相差の関係



(a) 同じ位相　(b) 電流が90°進んでいる　(c) 電流が90°遅れている

〈図2〉交流電圧源と接続される負荷



(a) 抵抗　(b) コンデンサ　(c) コイル

■ 位相を j という係数を使って表現してみる

● 複素数の考え方と計算方法

位相が90°ずれている，それも進んでいることを複素数の虚数部の j という係数を使い表現してみます．数学か！と思われるでしょうが，簡単に実数部と虚数部をもつ複素数の考え方と計算方法を示します．

複素数は $a + jb$ と表し，a が実数部，b が虚数部です．$1.1 + j3.5$ などと表します．

計算としては中学生の数学に，j も入れたままで単純に計算し，次の関係で j を消していくだけです．

$$\sqrt{-1} = j \quad \cdots\cdots (2)$$

$$-j = \frac{1}{j} \quad \cdots\cdots (3)$$

$$j^2 = -1 \quad \cdots\cdots (4)$$

$$(a + jb) + (c + jd) = (a + c) + j(b + d) \quad \cdots\cdots (5)$$

$$(a + jb)(c + jd) = (ac - bd) + j(bc + ad) \quad \cdots (6)$$

$$(a + jb)(a - jb) = a^2 + b^2 \quad \cdots\cdots (7)$$

$$\frac{1}{a + jb} = \frac{a - jb}{(a + jb)(a - jb)} = \frac{a - jb}{a^2 + b^2} \quad \cdots\cdots (8)$$

複素数の計算はそれだけなのです．難しく考えることはありません．この複素数での表現を使うと交流回路の解析が非常に楽になります．

さらに，

$$Ve^{j\omega t} = V(\cos \omega t + j\sin \omega t) \quad \cdots\cdots (9)$$

という表記もありますが，これは複素数を極座標として表したものです．突き詰めると複素数の表現ともども，回路の解析のしやすさのために，うまくつじつまの合う置き換えをしているのです．まずはこの係数 j を，単なる表記やおまじない程度に読んでいくと気が楽でしょう．

● 交流回路におけるオームの法則

それでは交流回路の電圧 V と電流 I の関係を，j を使って表してみます．電圧と電流の位相が同じときは，

$$I = k_1 V \quad \cdots\cdots (10)$$

電流の位相が90°進んでいるときは，

$$I = jk_2 V \quad \cdots\cdots (11)$$

電流の位相が90°遅れているときは，

$$I = -jk_3 V \quad \cdots\cdots (12)$$

ここで V と I は実数の比例係数である k_1，k_2，k_3 で結ばれているとします．この k は，電気の流れにくさです．皆さんは，うん？待てよ…電圧と電流の関係はオームの法則だ！と気が付くでしょう．では式(10)～式(12)を順に変形してみます．

$$V = \frac{1}{k_1} I \quad \cdots\cdots (13)$$

$$V = \frac{1}{jk_2} I = -j\frac{1}{k_2} I \quad \cdots\cdots (14)$$

〈表1〉図1と図2の関係

	図1(電圧・電流の位相関係)	図2(接続される負荷)
(a)	電圧と電流が同じ位相	抵抗 R
(b)	電圧に対して電流が90°進んでいる	コンデンサ C
(c)	電圧に対して電流が90°遅れている	コイル L

$$V = \frac{1}{-jk_3} I = j\frac{1}{k_3} I \quad \cdots\cdots (15)$$

となります．そうなのです．交流で位相関係が異なっていても，j という「おまじない」を使うとすべてオームの法則の範囲で計算できてしまうのです．

この電圧と電流との位相関係が異なるようになる，コンデンサやコイルの抵抗に相当する量を，リアクタンス X といいます．リアクタンスは抵抗と同じ「流れにくさ」の機能と，位相を90°変える機能をもっています．

■ リアクタンスからインピーダンスへ

● 抵抗と直列にコイルが接続された回路

図3で考えてみましょう．抵抗を1.1 Ωとし，コイルのリアクタンスを $j3.5$ Ωとします．抵抗とリアクタンスが合成されたものは，単純に直列接続の考え方を使って $1.1 + j3.5$ Ωと表すことができます．

この抵抗とリアクタンス成分を含んだものをインピーダンス Z といいます．実数部と虚数部をもった Z は，複素抵抗とでも呼ぶのがよいかもしれません．

インピーダンスといえども，抵抗成分がゼロであれば，インピーダンスはリアクタンス成分だけですし，リアクタンス成分がゼロであれば，インピーダンスは抵抗成分だけになります．インピーダンスを使えば交流回路の電流の流れにくさの状態をすべて表すことができます．このインピーダンスの考え方が交流信号を扱う回路ではとても重要です．

● オームの法則を改めて考えてみると

複素数を使えば，電子部品の交流での振る舞いも，このオームの法則ですべて表すことができるということです．やっぱり万能の公式なのです．

同じことが直並列接続の計算でもいえます．直流回路での抵抗値の計算と同じく，交流回路のインピーダンスの場合も，複素数を使えばまったく同様に表すことができます．

インピーダンスをもっと理解しよう

● 結局は3種類の素子しかない

発振回路や増幅回路を抜かして考えれば，電子回路は三つの素子ですべて表されます．何とそれはここまで示してきた，抵抗，コンデンサ，そしてコイルなのです．これだけわかっていれば，電子回路は複雑でそ