

プラズマ産業は、直流からギガヘルツ帯までの幅広い周波数の電力を使用しています。この電力をプラズマ負荷に結合させる、つまり、プラズマチャンパのインピーダンスを電源装置の必要条件に適合させるのに様々な方法があります。

プラズマは、図1に示す通り、並列に接続されたダイオード、抵抗ならびにコンデンサによって電気的に表現することができる。

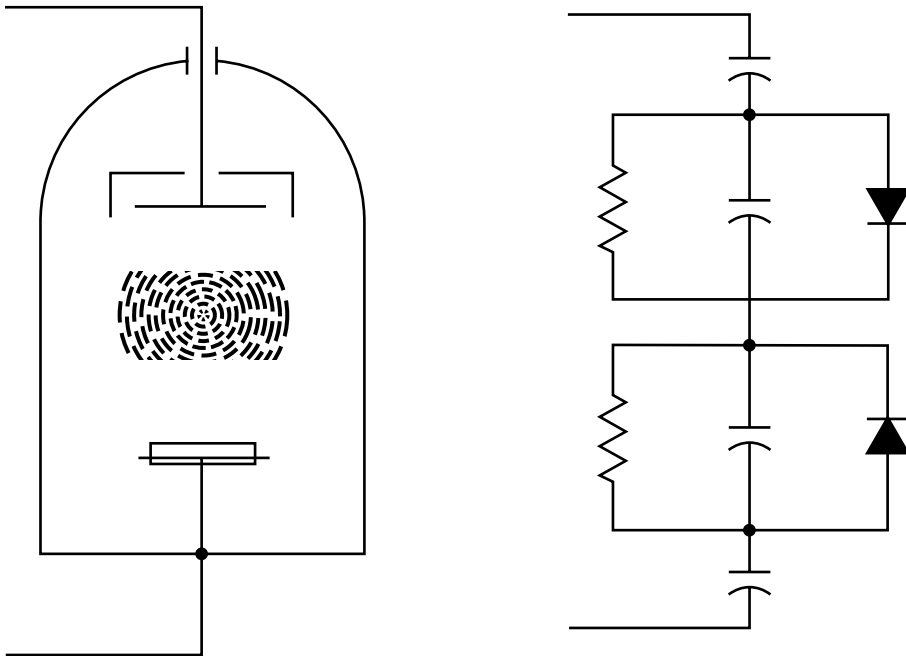


図 1. 簡単なプラズマの電気的等価回路

これはごく単純なモデルであるが、プラズマの基本特性をよく表している。ダイオード効果は、電子がイオンよりもはるかに速く移動するために生じる(それは、電子のほうがイオンよりずっと軽いからだ)。ダイオード効果は、多数の高調波(入力周波数の倍数の)を発生させることができる。この種の効果は、プロセスやチャンパによって左右されるが、整合ネットワークを設計する際の関心事としては、むしろ副次的なものである。

高周波電源の多くは、出力インピーダンス50 Ωで運転するように設計されている。それは、この値が高周波電源の測定および伝送に用いる業界標準として定着しているからである。つまり、インピーダンス整合ネットワークの役割は、プラズマの抵抗特性およびコンデンサ特性を負荷50 Ωに合わせて変換し、それによって負荷インピーダンスを高周波電源のインピーダンスに整合させることである。

電源と負荷インピーダンスを整合させるのに最もよく使われている方法に、次の2つがある。

- ・ トランスを使う方法
- ・ 整合ネットワークを使う方法

本書では、インピーダンス整合ネットワークの構築に必要な部品の数値と種類を計算するのに使われるツールであるスミス(Smith®)チャートを使って、これら2つの方法を考察しながら紹介していきたい。

上記の2つのインピーダンス整合方法を比較すると、それぞれ用途と長所が異なることがわかる。

トランス:

- ・インピーダンス整合ネットワークの最も単純な形態。
- ・設置が容易
- ・設計が単純
- ・軽量
- ・安価
- ・1 MHz未満の各種用途に最もよく使われている。

トランスは、負荷の抵抗成分をほぼ正しく整合させるのに適している。ただし、インピーダンスは厳密には整合しない可能性があるため、電源は、反射波電力を吸収する能力を必要とします。(普通は、熱エネルギーに変換)

整合ネットワーク:

- ・1 MHz以上の各種用途によく使われている。
- ・トランスを使った方法よりもインピーダンスの整合が正確にできる
- ・一般にはトランスよりも大きく、設置も難しい。
- ・トランスよりも設計が難しい。

整合ネットワークはインピーダンス整合に効果的なので、反射電力による熱の発生は、ふつうはそれほど問題にならない。

トランス

トランスとは、ソース電源をある電圧・電流レベルから別の電圧・電流レベルに変圧する装置である。ソースから負荷に変圧される電源レベルを最大にするためには、負荷インピーダンスが電源の出力インピーダンスに整合していなければならない。

負荷インピーダンスは変圧比の二乗として変換される。その変圧比をNと呼ぶ。Nは、入力側の巻線数(一次巻線数)を出力側の巻線数(二次巻線数)で割った数字によって決まる。入力側の巻線数が200、出力側の巻線数が100なら、それは2:1降圧トランスと呼ばれる。純負荷が抵抗100 Ω、2:1降圧トランスを使う場合(N=2)、電源側から見たインピーダンスは次のようになる。

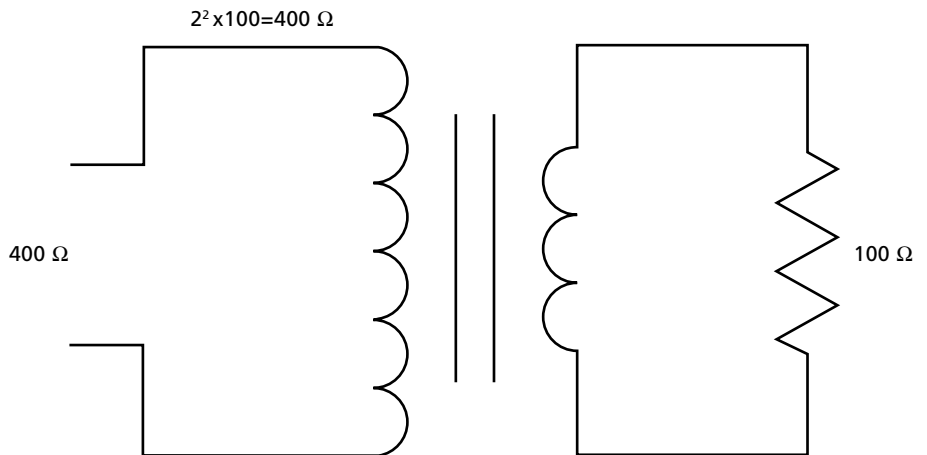


図 2. 2:1降圧トランス回路図

昇圧か降圧か

「昇圧」および「降圧」は、トランスを通過する電圧または電流を変える(変圧する)トランスの機能を指す言葉である。トランスに入力される電力(電圧×電流)は(無視できる程度の損失を除けば)、それから出力される電力に等しい。つまり、降圧トランスは、入力電圧をそれより低い出力電圧に変えながら、入力電流をそれより高い出力電流に変える装置である。昇圧または降圧という言葉は一般に、電圧の昇降を意味する。

電源の求める負荷インピーダンスが50 Ω、実際の負荷が100 Ωの場合は、変圧比が1.41:1の昇圧トランスが必要となる。つまり、この昇圧トランスでは $1.41^2=2$ のインピーダンス変換が行われるので、負荷インピーダンスを変圧比で割ることによって、電源の側から見た入力インピーダンスが求められる。

$$100/2=50 \Omega$$

トランスのインピーダンス整合は、インピーダンスの実数部分だけに適合することに注意したい。負荷のリアクタンスが大きければ、トランスはこの虚数部分を除外することができない。実際、トランスは負荷インピーダンスの虚数部分を増幅することがある。この虚数部分は、電源の反射波電力となって現れる。

インピーダンス整合トランスを用いた電源は、反射波電力を許容する必要があるため、他のタイプの電源よりも堅牢に作られていなければならない。もし負荷インピーダンスが電源の出力インピーダンスに適合していなければ、電力は負荷から電源の側に反射され、電源の構成部品にかかるストレスが増大する原因となる。

進行波(フォワード)電力、反射波電力、負荷(ロード)電力

進行波電力とは、電源が発生して、負荷に送り込もうとする電力である。反射波電力とは、負荷から「跳ね返される」電力をいう。反射波電力は、負荷インピーダンスが電源の必要条件に適合していないときに発生する。負荷電力とは、実際に負荷に送り込まれた電力の総量である。多くの場合、これは進行波電力から反射波電力を引いた値に等しいと見なす。

電源によっては、進行波電力と反射波電力を正確に測定することができるものがある。この種の電源でインピーダンス整合を試みることによって、反射波電力の発生を抑制できる。

電源によっては、この整合を自動的に行うものもあるし、または、適切な変圧比を手動で選択して行うものもある。

このほか、出力される電力、電圧、電流を表示できる電源もある。電力の計算は次のように行われる。

$$P=V \times I \times \cos(\theta)$$

ただし P=電力、V=電圧、I=電流、 $\cos(\theta)$ =電圧と電流の位相角のコサイン(余弦)

この種の計器を使う場合は、電圧と電流の積が、計器に表示される実際の電力にできるだけ近くなるように最適化することが不可欠となる。これによって、電圧と電流の位相角が最小限に抑えられ、最大限のエネルギーが負荷に送られるようになる。

インピーダンス整合ネットワーク(チューナー)

1 MHzを超える用途には、インピーダンス整合ネットワーク、つまりチューナーが必要となる。有効なインピーダンス整合ネットワークの構成に使われる主な素子には、コンデンサとインダクタがある。

直列接続回路

ある素子の一端を次の素子に電氣的に接続するとき、素子が直列接続されているという。電流は最初の素子から次の素子へと流れる。

並列接続回路

ある素子の両端を次の素子に電気接続するとき、素子が並列接続されているという。電流は両方の素子に同時に到達する。

図 3 では、コンデンサAがインダクタBに直列接続、コンデンサCがインダクタDに並列接続されているのがわかる。

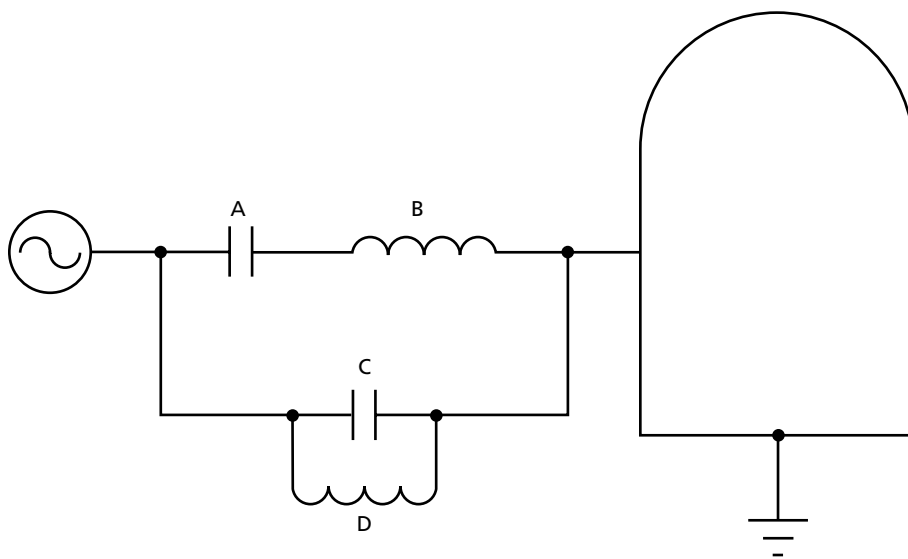


図 3. 回路素子の直列/並列接続図

直列/並列回路の変換

次の等式は、直列回路と並列回路の間の成分値の変換方法のひとつを示したものである。

$$R_s = R_p / (1 + (R_p / X_p)^2)$$

$$X_s = R_s R_p / X_p$$

$$R_p = (R_s^2 + X_s^2) / R_s$$

$$X_p = (R_s^2 + X_s^2) / X_s$$

ただし R_s =直列抵抗、 X_s =直列リアクタンス、 R_p =列抵抗、 X_p =並列リアクタンス

スミス(Smith)チャート

インピーダンス整合ネットワークを構築するのに必要な素子の値を計算するには、電源の出力インピーダンスと負荷インピーダンスを理解する必要がある。プラズマは、電気的インピーダンスを持っていると想定することができる。これにより、標準的な電子整合ネットワーク設計技術を利用することができる。

実際の設計では、各素子の許容電力や素子のパッケージングによる影響など他の要因も含めて理解し、これらを考慮に入れる必要がある。ただし、まず理解しておくべき基本的なパラメータはインピーダンスであるから、ここではそれを中心に説明する。

素子の値を判断するひとつの方法は、回路の数値分析を行うことである。ただしこれは時間がかかる上に、複雑である。もうひとつの方法は、スミスチャートを使って図形的に分析する方法である。その例を図 4 に示す。

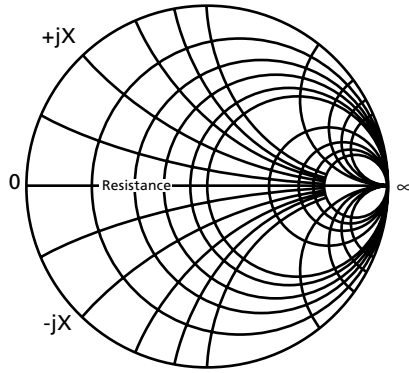


図 4. スミスチャート

スミスチャートには、電子回路の電気的特性を計算するのに使われる多数の座標が含まれている。最近では、設計者がスミスチャートをプリントした透明なプラスチックシートを使って、ひとつのチャートを別のシートの上を書くことで素子の値を求めることができる。このスミスチャートは、コンピュータ化された多数の設計プログラムにも搭載されている。

スミスチャートの成り立ちを理解するために、図 5 の基本 X-Y 座標系を参照されたい。2次元上のこのチャートにインピーダンス値をプロットすることができる。

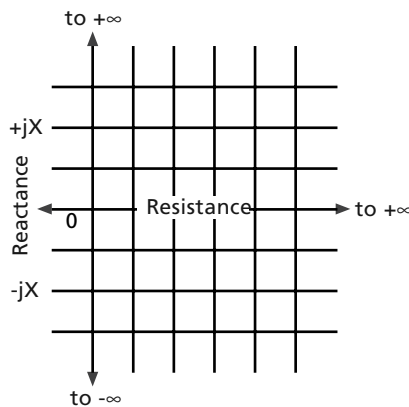


図 5. 基本的な X-Y 座標系 (X 軸 抵抗 Y 軸 リアクタンス)

図 6 は図 5 に似ているが、X 軸と Y 軸は対数座標である。

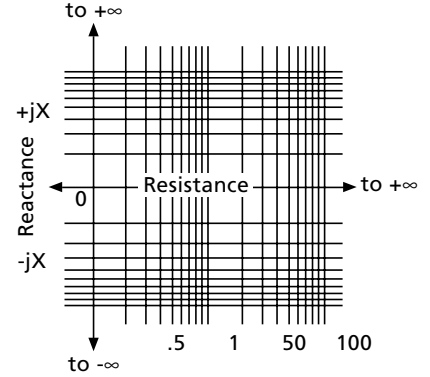
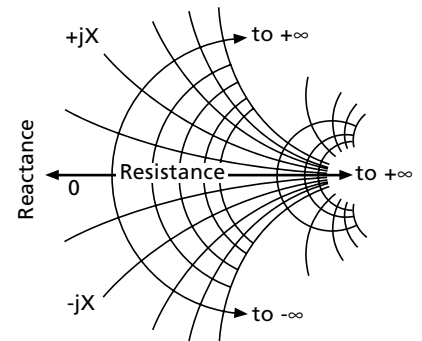
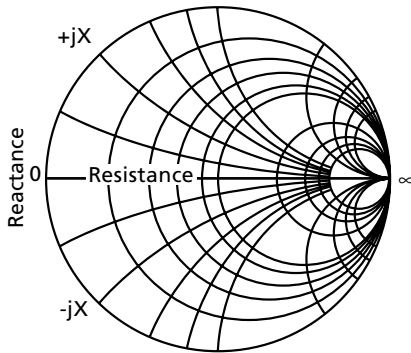


図 6. 対数 X-Y 座標系

ここで、図 7 に示す通り X-Y 座標系の端点(∞=無限記号)を曲げると、それがスミスチャートを構成することがわかる(図 8)。



軸に沿って端点(∞記号)を曲げると
図 7. X-Y 座標系の端点を曲げてスミスチャートを構成する



スミスチャートを形成する

図 8. すると、X-Y座標系スミスチャートになる

図8を詳細に検討してみると、チャートの各線の目的が明らかになる。水平に伸びている直線は、この回路の実際の抵抗値を表している。この直線は、元のX-Y座標系のまま変わっておらず、0～ ∞ だけが示されている。つまり、中央線を横切る円(「定抵抗円」と呼ばれることがある)が定数、すなわち回路の「実際の」抵抗値を表している。これらは、元のグラフでは垂直基準線だった。

中央線に接して伸びている円弧は、回路のリアクタンス(キャパシタンスとインダクタンス)の虚数の値を表している。これらは、元のグラフでは水平基準線だった。

ここで、チャートの中央を横切る円が「1」と表示されていることに注目してほしい。これは「単位円」と呼ばれるものである。ある出力インピーダンス値をたとえば50 Ω として、このチャートの基準点すべてにそのインピーダンス値を乗じると、新たな基準点の値をベースに計算される。

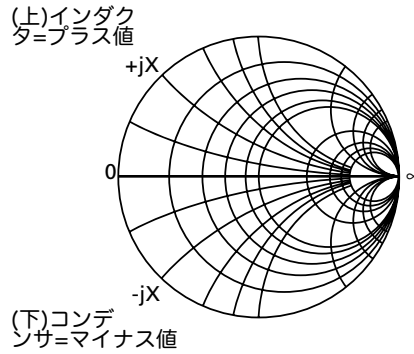


図 9. スミスチャートの個々の位置によって素子のタイプと数値が決まる

図 9を使って確かめると、次のことがわかる。

- ・ インピーダンスチャート上でコンデンサのインピーダンス値はマイナスになるので、それらは中央線より下に表示される。
- ・ インダクタのインピーダンス値はプラスとなるので、それらは中央線より上に表示される。

図 10に示す通り、スミスチャートは「インピーダンスチャート」と「アドミタンスチャート」の2つの基本形態がある。

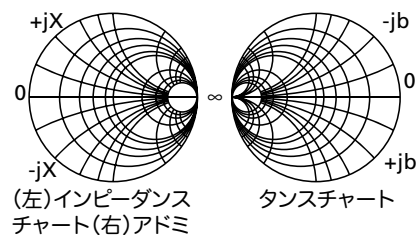


図 10. スミスチャートの2形態

アドミタンスチャートはインピーダンスチャートと鏡像の関係にある。アドミタンスはインピーダンスの逆数で、単位はジーメンス(S)で表される。これら2つのチャートの逆数関係のために、「j」についている \pm 記号が互いに逆になっている。

IEEEが推奨するアドミタンスの単位として、今日では「モー」の代わりに「ジーメンス」が使われているので注意すること。

回路を設計する際には、図 11に示す通り、インピーダンスチャートとアドミタンスチャートを重ね合わせると便利である。見てわかるように、紙を使って作業すると、重ね合わせたチャートが非常にごちゃごちゃして作業しにくい。必要な情報だけをインピーダンスチャートとアドミタンスチャートの間で転記しやすくするために、場合によっては透明なシートを使うことがある。情報の転記作業を簡単にするために、コンピュータプログラムを使うこともある。本書ではわかりやすくするために、アドミタンスチャートから単位円だけを取り出したインピーダンスチャートを後ほど使用する。

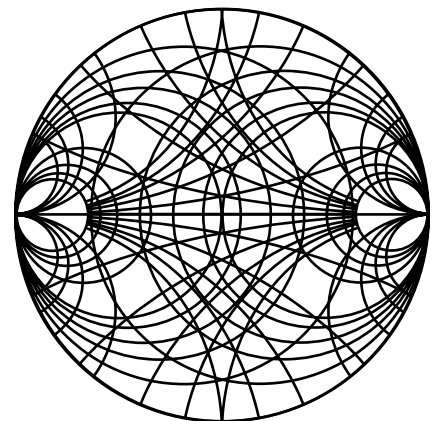


図 11. インピーダンスチャートとアドミタンスチャートを重ね合わせる

AEホワイトペーパー『電源装置およびプラズマ装置入門』(Introducing Power Supplies and Plasma Systems)でも述べたように、アドミタンスは、回路中の電流の流れやすさを表している。

アドミタンス = 1 / インピーダンス

したがって、たとえばその回路のインピーダンスが50 Ωだとすると、アドミタンスは次のようになる。

アドミタンス=1/50 Ω=0.02 S

スミスチャートを使うことによって、インピーダンス整合回路のある部分にどのようなタイプの素子が必要になるか、その素子の値をどうしなければならないかを判定することができる。それを求めるには、負荷インピーダンスから始めて、それをチャートに写して、インピーダンス最適値に達するポイントを探せばよい。この例ではインピーダンス最適値を50 Ωとしているが、それは、プラズマ装置用の電源の出力回路の大多数が、負荷50 Ωに対して電力を供給するように設計されているからである。

インピーダンスチャートとアドミタンスチャートは、インピーダンス整合回路のそれぞれ異なる部分において各素子に必要なとされる成分値を計算するのに使われる。アドミタンスチャートが並列接続された素子の値を示すのに対し、インピーダンスチャートは直列接続された素子の値を示す。

インピーダンスチャートを使うということは、直列素子を使用することを意味する。図 12によると、インピーダンスチャートにおいて実際の軸に沿って時計回りに進むと、直列インダクタを追加しなければならないことがわかる。逆に反時計回りに進むと、直列コンデンサを追加しなければならないことがわかる。

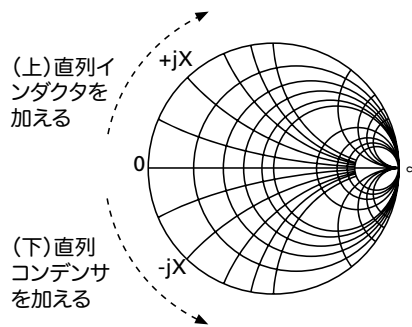


図 12. インピーダンス・スミスチャート上で定抵抗円に沿って進むと、どのようなタイプの直列素子を追加すべきかわかる

これらの曲線は、X-Y座標系上では垂直線であったことを思い出そう。X-Yグラフ上で上方に進めばインダクタンスを加えることを意味し、逆に下方に進めばキャパシタンスを加えることを意味する。これらの線はそれぞれ円形に変換されているので、この動きは時計回り、または反時計回りに変換されている。

ここで起こっていることを図で説明するために、ここで2つの例を見ることにしよう。図 13は、負荷インピーダンスが10-j20 Ωとなる点Aを示している。純抵抗値が10 Ωになるようにしたければ、+j20 Ωのインダクタンスを加えることによって、-j20 Ωのキャパシタンスを相殺すればよいことがわかる。

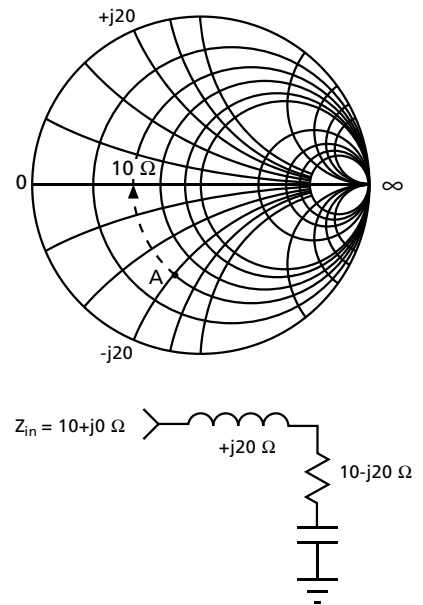


図 13. 直列インダクタを加えることによってチャートを時計回りに進めた例

図 14 は、負荷インピーダンスが10+j20 Ωとなる点Bから始まっている。ここで-j20 Ω直列コンデンサを加えると、その結果インピーダンスは10+j0 Ωとなる。

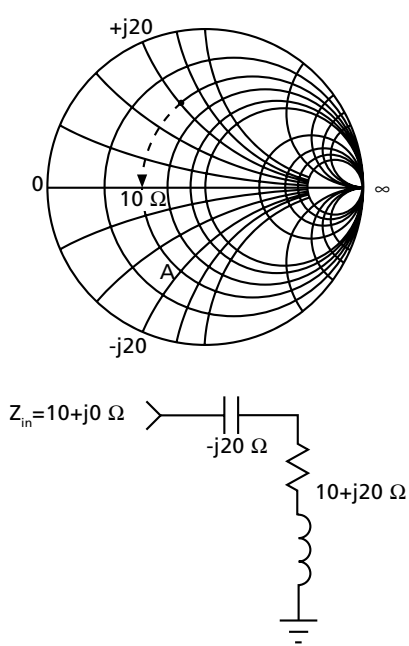


図 14. 直列コンデンサを加えることによってチャートを反時計回りに進めた例

アドミタンスチャートを使うということは、並列素子を使用することを意味する。図 15 によると、アドミタンスチャートにおいて実際の軸に沿って反時計回りに進むと、並列インダクタを追加しなければならないことがわかる。逆に時計回りに進むと、並列コンデンサを追加しなければならないことがわかる。

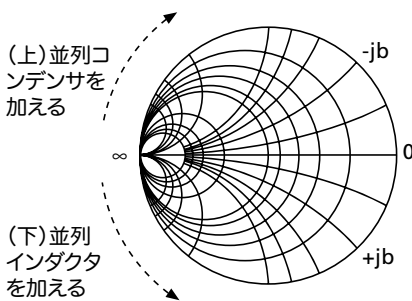


図 15. アドミタンス・スミスチャート上で軸に沿って進むと、どのようなタイプの並列素子を追加すべきかがわかる

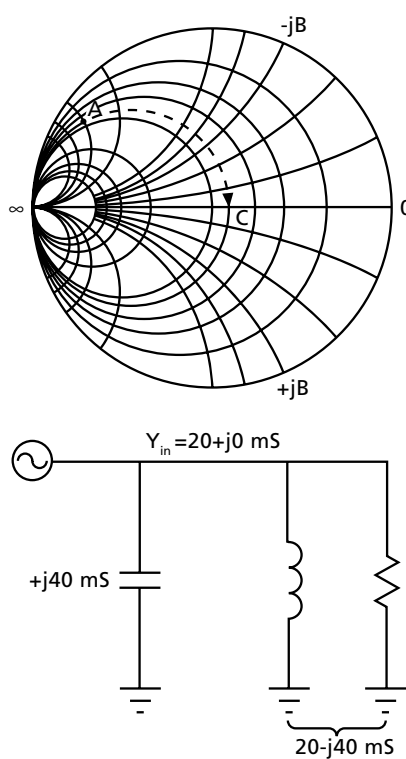


図 16. 並列コンデンサを加えることによってチャートを時計回りに進めた例

ここで起こっていることを図で説明するために、ふたたび2つの例を見ることにしよう。図 16は、負荷アドミタンスが $20 - j40 \text{ mS}$ となる点Aを示している。コンデンサを1個加えることで、その線と交差する点まで時計回りに進むと、そこで点C($20 + j0 \text{ mS}$)に戻る。

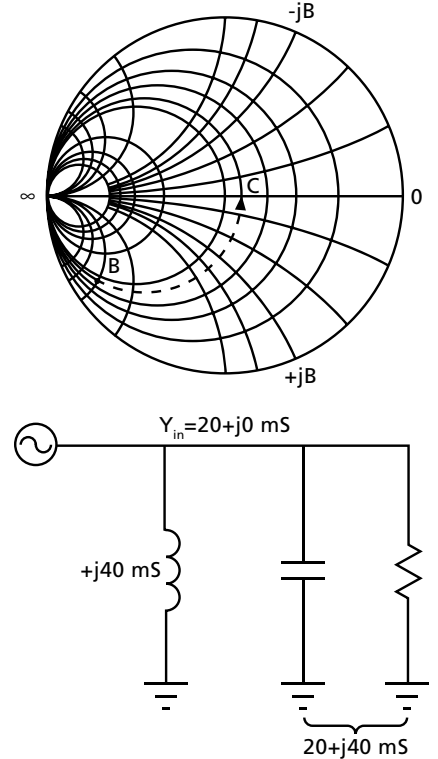


図 17. 並列インダクタを加えることによってチャートを反時計回りに進めた例

図 17は、アドミタンスが $20 + j40 \text{ mS}$ となる点Bから始まっている。ここで $-j40 \text{ mS}$ のインダクタを加えると、スミスチャートを反時計回りに進み、その結果、アドミタンスの合計は $20 + j0 \text{ mS}$ となる。

スミスチャートを使う

スミスチャートの使い方を説明するために、電源とプラズマチャンバとで構成する単純なインピーダンス整合ネットワークを図18に示す。

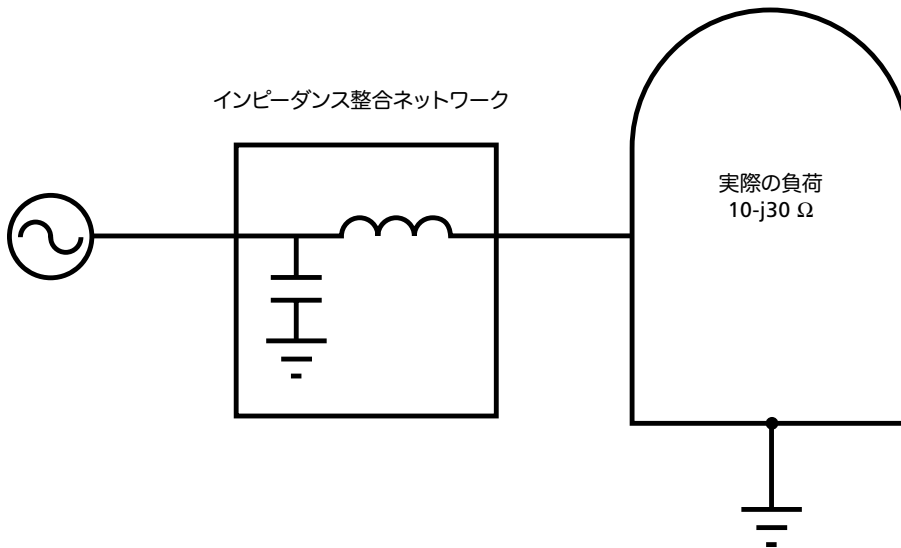


図 18. インピーダンス整合ネットワークの簡略図

ここでわれわれの目標は、端的で簡単なインピーダンス整合ネットワークを設計することである。プラズマチャンバの負荷インピーダンスは $10-j30\ \Omega$ とわかっている(この数値はチャンバを測定するか、または既知のインピーダンス整合ネットワークで求められる)。ここで、負荷インピーダンスが電源に対して $50\ \Omega$ の純抵抗負荷となるように、その数値を変えたい。図 19に示す通り、その数値はインピーダンスチャートとアドミタンスチャートを両方とも使うことによって求めることができる。

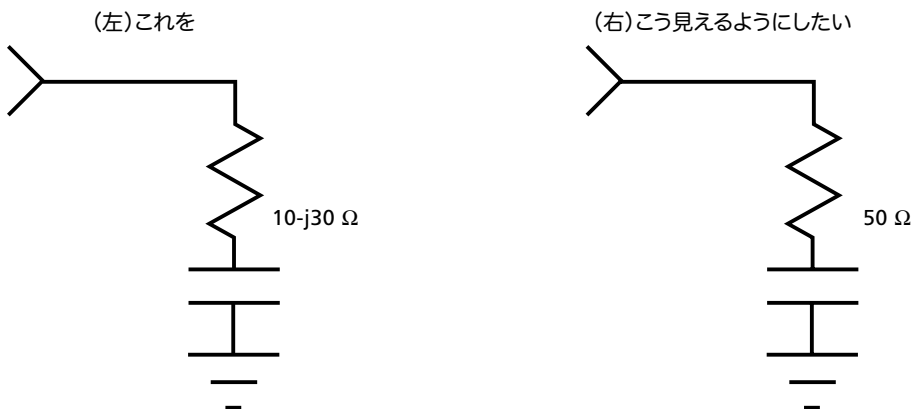


図 19. プラズマチャンバの負荷インピーダンスを $50\ \Omega$ の純抵抗負荷となるようにしたい

図 20では、インピーダンスチャート上の点A ($10-j30$)から始める。このチャートでは、アドミタンスチャート用の単位円が点線で記入されている。できれば、インピーダンスチャートと重なっているアドミタンスチャート全体を表示したい。ここでは混乱を避けるために、アドミタンスチャートの単位円だけを表示する。単位円が重要な意味を持つ理由は、それがチャート上の $20\ \text{mS}$ ポイント($50\ \text{オーム}$ ポイント)を通過するからである。

ここで、負荷インピーダンス、点A、ならびにアドミタンス単位円の距離に注目する。ここに2つの交差点があることに気付くだろう。これらの点はいずれも有効に利用できる。つまり、それを使って計算しても、この特定の負荷インピーダンスについてうまく機能する整合ネットワークを求めることができる。ただし、ここでは遠いほうのポイントを使用することにする。そのほうがチューニング範囲が広く取れるからで、そのためにプラズマインピーダンス整合に最もよく使われる方法のひとつとなっている。そこで点Bが求められる。インピーダンスチャート上を時計回りに進むので、この反応値により直列インダクタを使わなければならないことがわかる。リアクタンス合計値は $50\ \text{オーム}$ に等しくなる。周波数 $13.56\ \text{MHz}$ では、これは $587\ \text{nH}$ のインダクタに相当する。図 20はこのほか、等価回路も示している。

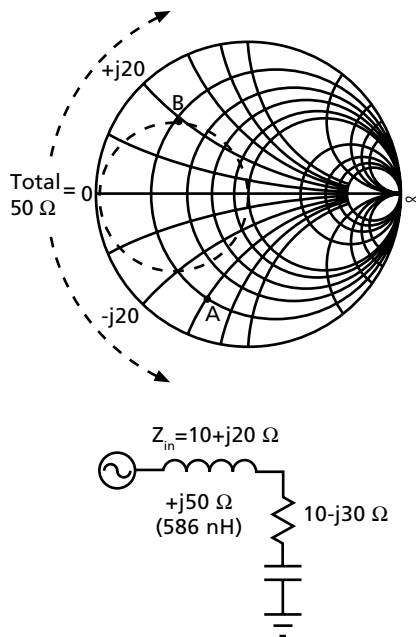


図 20. インピーダンスチャートを使って定抵抗円に沿ってリアクタンスを変換する

そこで今度はアドミタンスチャートに移ることができる。(インピーダンスとアドミタンスの)2つのチャートを重ね合わせ、上の図にピンを刺せば、下の図でそれに対応する等価点を求めることができる。これはどうして可能になるのだろうか。ここで、インピーダンスが複素数であることを忘れてはならない。インピーダンスチャートの点Bでは、その値は $10+j20$ となる。アドミタンスはインピーダンスの逆数である。インピーダンスの逆数を求めて、それに共役分の共役数 (=1) を乗じることにより、分母から j を除去する。

$$\frac{1}{(10+j20)} \times \frac{(10-j20)}{10-j20} = \frac{(10-j20)}{(100+j200-j200+400)}$$

$$= \frac{(10-j20)}{500} = 0.02-j0.04 \text{ S} = 20-j40 \text{ mS}$$

インピーダンスチャートの点Bは、アドミタンスチャートの点Bと一致する。ここでは単に、それぞれ異なる単位で表示しているに過ぎない。ここで、アドミタンス単位円に沿ってこの点を回転させると、望ましい 20 mS (点C) が求められる。時計回りに回転させるので、並列コンデンサが必要になることがわかる。点Cまでの距離は 40 mS となり、周波数 13.56 MHz では、これは 470 pF のコンデンサに相当する。図21は、その結果として得られる円の形状を示している。

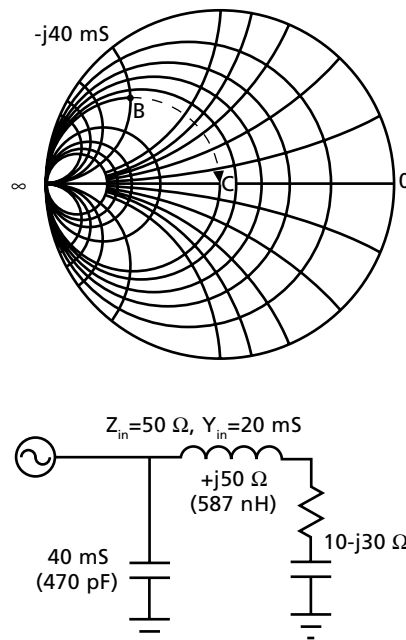


図 21. アドミタンスチャートを使って定抵抗円に沿ってサセプタンスを変換する

これで単純な一点インピーダンス整合ネットワークの設計が完了した。AEのエンジニアはスミスチャートを使って各種のプラズマ装置のインピーダンス整合ネットワークを設計している。

スミスチャートに関するその他の情報は『スミスチャートの電子的用途』(*Electronic Applications of the Smith Chart*, Phillip H. Smith著、ISBN 0-89874-552-7)参照。



Advanced Energy Japan • 2971-9 Ishikawa-cho, Hachioji • Tokyo 192-0032
T: 81.042.645.8713 • F: 81.042.645.8714 • aej_sales.info@aei.com • www.advanced-energy.co.jp
Please see www.advanced-energy.com for worldwide contact information.

© Advanced Energy Industries, Inc. 2007
All rights reserved. Printed in U.S.A.
JPN-WHITE18-270-02 0M 7/07