

ディスクリミネータ(Discriminator)について - 同調検出の仕組み -

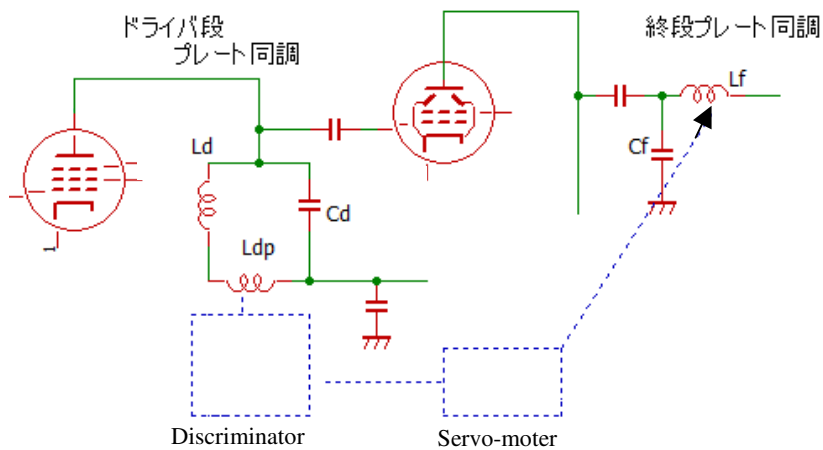
2018.08.08 JA1VCW

1. はじめに

アメリカの軍用の真空管の自動同調リニアアンプの回路図を見る機会がありました。半導体の時代にいまさら真空管のアンプでもないのですが、回路的に興味がありました。古い物は40年以上前の機械ですが、その中で必ず使われているディスクリミネータや、プレートやグリッドの同調の仕組みを調べてみました。さらに自動同調のアンテナカプラについても一部調べました。

2. 典型的なモデル

いくつかの機種をみましたが、典型的なブロック図はこのようです。



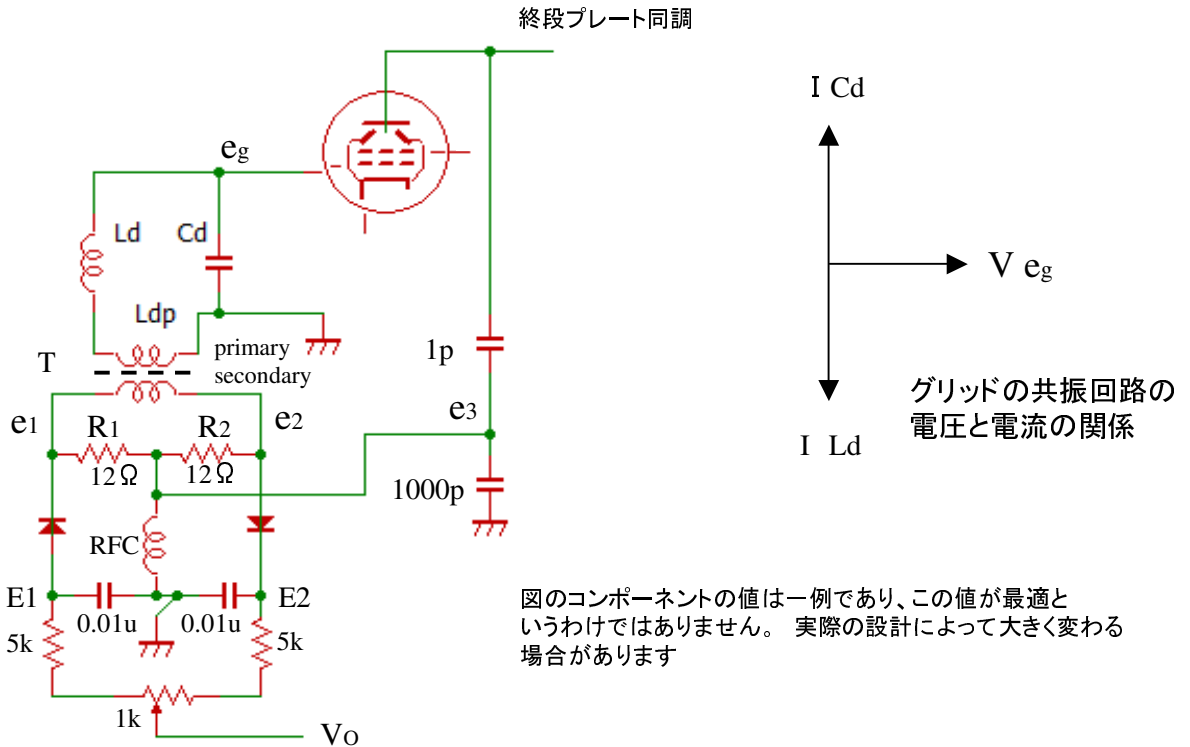
このような構成で、 L_{dp} を含むトランスとDiscriminator(以下ディスクリと略)でServo Motorを動かし、最終的に終段プレート同調を正確に増幅すべき周波数に共振させることが目的です。どのように動いているのでしょうか。

アンプの中には必要な増幅周波数まで、あらかじめ同調回路の共振周波数を可変させて近づけたり(共振周波数があまりにかけ離れているとディスクリ自体が動作しない)、また終段もプレート同調の他ローディングの調整も制御系で行っている様な機種もあります。ここでは同調検出の仕組みにのみ限定します。

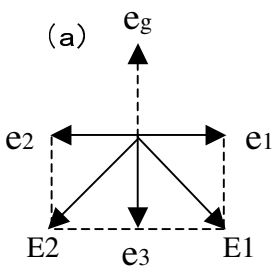
3. 回路の動作

参考文献にとっても分かりやすい説明がありました。以下はその内容(意訳+私の考察)です。

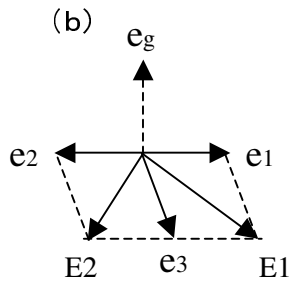
- 1) ドライバ段プレート同調、および終段プレート同調はともに可変コイル(バリL)でインダクタンスが可変できます。現在は $L_d + L_{dp}$ と C_d によって増幅すべき周波数に共振しています。
- 2) L_{dp} は L_d の cold 側に結合されたトランスTの1次側で、例えば巻き数1回などと L_d に比較して十分小さいインダクタンスです。トランスは透磁率の高いコアに巻かれて、1次、2次巻線間にファラデーシールドが施されていることが多いようです。



- 3) R_1, R_2 はトランスTの2次側のリアクタンスに対して小さい値の抵抗です。(10~100Ω程度)
これによってTは電流トランスとして動作します。電流トランスですから1次の電流と、2次側の短絡電流(ここでは小さい値の抵抗が入っていますが)は1次電流に比例し、巻数比に逆比例します。電流位相も保存されます。そしてこの小さい値の抵抗により電流に比例した電圧が取り出されます。
- 4) グリッド電圧 e_g と L_d, C_d の電流の関係を考えると、 e_g に対して L_d の電流は90度遅れ、 C_d の電流は90度進みます。(上右図)
- 5) トランスTの1次側 (L_{dp}) は L_d と C_d による共振回路の L_d の電流をピックアップしているため、2次側の電圧 e_1, e_2 は共振回路の電流と比例します。
- 6) 真空管のプレートの電圧を分圧して (e_3)、 R_1, R_2 の接続点に印加した時のベクトル図は下の様です。プレート同調が正しくとれている時、 e_3 は e_g に対して180度位相差があります。図は $e_1 (I L_d)$ を基準にしています。



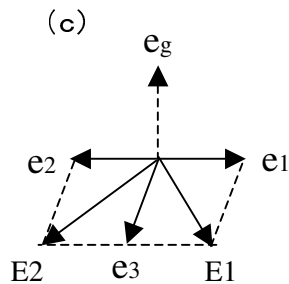
プレート同調が正しく取れて e_3 が e_g と180度の位相差となっている時。
 E_1, E_2 は $e_1 + e_3$ および $e_2 + e_3$ をダイオードで整流したDC電圧なので絶対値のみ意味を持ちます。この回路では E_1 は負電圧、 E_2 は正電圧を出力します。図のように $|E_2| = |E_1|$ なので $V_o = |E_2| - |E_1| = 0$ です。
 (正確には $(|E_2| - |E_1|)$ には係数がかかります。以降も同様)



プレート同調が正しく取れておらず e_3 が e_g と180度の位相差ではない場合。
(e_1 と e_3 の角度が90度より小さい時)

E_1, E_2 は $e_1 + e_3$ および $e_2 + e_3$ をダイオードで整流したDC電圧なので
絶対値のみ意味を持ちます。この場合は $|E_1| > |E_2|$ です。

従って $V_o = |E_2| - |E_1| < 0V$ です。



プレート同調が正しく取れておらず e_3 が e_g と180度の位相差ではない場合。
(e_1 と e_3 の角度が90度より大きい時)

E_1, E_2 は $e_1 + e_3$ および $e_2 + e_3$ をダイオードで整流してDC電圧なので
絶対値のみ意味を持ちます。この場合は $|E_1| < |E_2|$ です。

従って $V_o = |E_2| - |E_1| > 0V$ です。

このようにプレート側の電圧 (e_3) の位相によって出力 V_o が変化し、 e_3 の位相が e_g と180度の時に
 $V_o = 0V$ 、それ以外は180度に対しての位相差に応じて±の電圧が発生します。

例えば V_o にセンター0Vの電圧計を接続して、プレートの同調回路を操作して $V_o = 0V$ になるよう
すれば正しく同調操作ができることになります。

自動同調の場合には V_o をサーボモーターの入力とし、モーターをプレート同調回路の可変コイルや
可変コンデンサに接続して、 $V_o = 0V$ になるようにモーターを制御します。

注意すべきことは、この方法でプレート側の同調は正確に実現しますがその同調点がプレートの
最適負荷であるかどうかとは関係ないので、同調点がプレートの最適な負荷になるようにタンク回路の
定数を設計しておくことが必要です。(一般的には当然そのように設計します)

参考文献によると、プレートの同調回路の位相差の誤差は最適値(グリッドとプレートの位相差180度)
の±5度程度以内が良い様です。

電流トランスと電圧トランスという呼び方ですが、正しい用語かどうか分かりません。

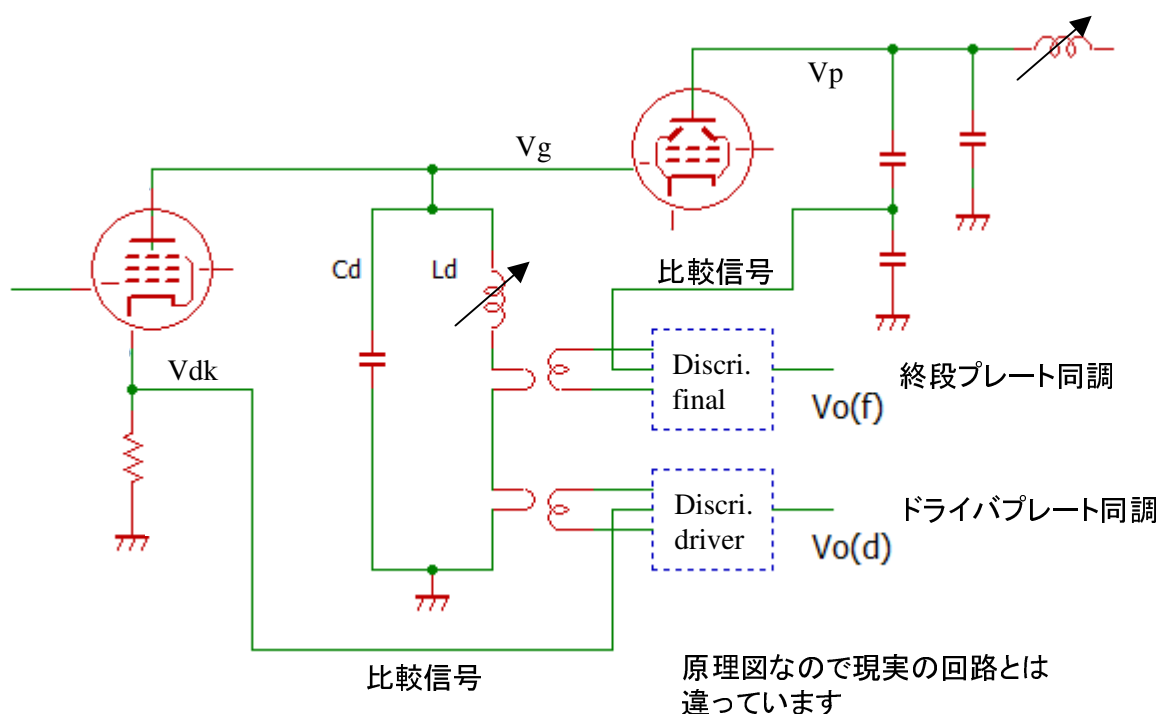
本稿では下記の働きのトランスをそう呼ぶことにします。

・1次側入力が電流で、2次側出力も電流 => 電流トランス

・1次側入力が電流で、2次側出力は電圧 => 電圧トランス

4. ドライバのプレート同調

終段プレート同調はそのグリッド同調回路 (= ドライバプレート同調回路)の電圧に対して180度の位相差ができるように調整されました。 それではドライバのプレート同調はどうするの? という事になります。 それは終段の同調と同じ原理で行います。



- 1)ドライバの入力信号 (V_{dk})とドライバ出力同調ディスクリ (Discri.driver)によってドライバのプレート同調を正しく合わせます ($V_{o(d)} = 0V$ になるように L_d を調整)。
 - 2)ドライバのプレート同調回路の信号 (V_g)と終段プレート電圧 (V_p)で終段出力同調ディスクリ (Discri.final)を動作させて終段のプレート同調を行います ($V_{o(f)} = 0V$ とする)。
- これによってドライバ、終段ともに正しい同調が得られます。

5. ここまでのまとめ

- 1)真空管のグリッドとプレートの電圧の位相差は180度にした。
- 2)電流トランスの1次、2次の位相差は0度又は180度です。(トランスの接続によってどちらかになる)
- 3)並列共振回路の両端の電圧と、コンデンサ又はコイルに流れる電流は90度の位相差を持つこと。
- 4)ディスクリは2つの入力の位相差が90度の時に出力が0Vとなります。

3)でグリッド電圧を、同調回路のLの電流をトランスで電圧に変換することでグリッド電圧と90度ずらした信号を作り、4)でプレート電圧と3)の信号を比較して90度の差の時に0Vになるようなディスクリ、つまり前記の回路に入力します。

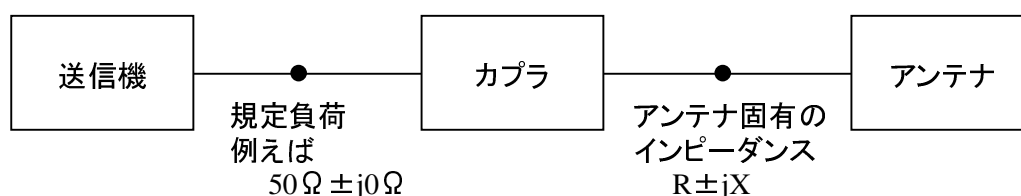
そしてプレート同調回路を可変してディスクリの出力を0Vにすれば、グリッドとプレートの位相を180度に正しく合わせることができます。そしてこの点が正しく同調された点になります。

6. アンテナカプラにおけるディスクリ

アンテナカプラにもディスクリが使用されています。
参考文献にとっても分かりやすい説明がありました。

6.1 アンテナカプラについて

カプラは下図のようにアンテナと送信機の間に入れてアンテナのインピーダンスを、送信機の規定の負荷インピーダンス(規定負荷)に変換するように動作します。
また、規定負荷は純抵抗($R \pm j0$)であることが必要です。リアクタンスを含む場合はまれですし、その場合は以下の方法では調整が難しいこととなります。



6.2 カプラの構造

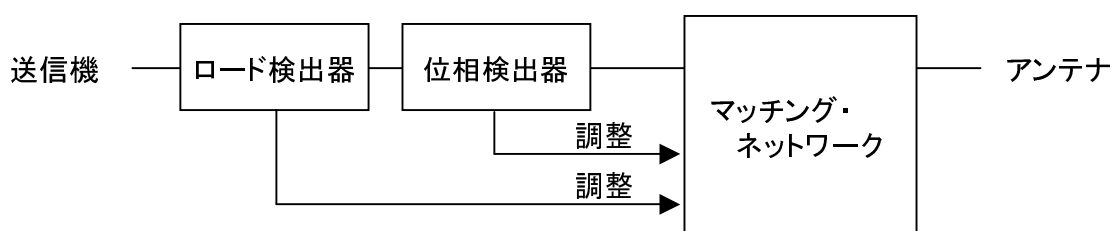
カプラの構造は次のようです(下図)。

- 1)ロード検出器 送信機の負荷状態が規定負荷になるようにマッチング・ネットワークを操作します。規定負荷とは送信機の負荷としてあらかじめ設定された値です。
- 2)位相検出器 電圧と電流の位相を検出し、送信機の負荷状態のリアクタンス分を“0”になるようにマッチングネットワークを操作
- 3)マッチング・ネットワーク アンテナのインピーダンスを送信機の規定負荷になるように変換する回路網です。

すなわち、

- 1)位相検出器で電圧と電流の位相差が無くなれば送信機から見た負荷は純抵抗です。
 - 2)ロード検出器で負荷抵抗の値が目的の値と合っていることが分かります。
- これらによってマッチングネットワークを調整して送信機の負荷を規定負荷に合わせます。

本稿ではディスクリがテーマなので、1)、2)のみの動作について述べます。



6.3 各検出器について

一般に2つの検出器を使用します。例を下図に示します。

6.3.1 ロード検出器

1) 下図のLoading の部分です。T1は電流トランスで前述 3.2)3) 項 参照です。

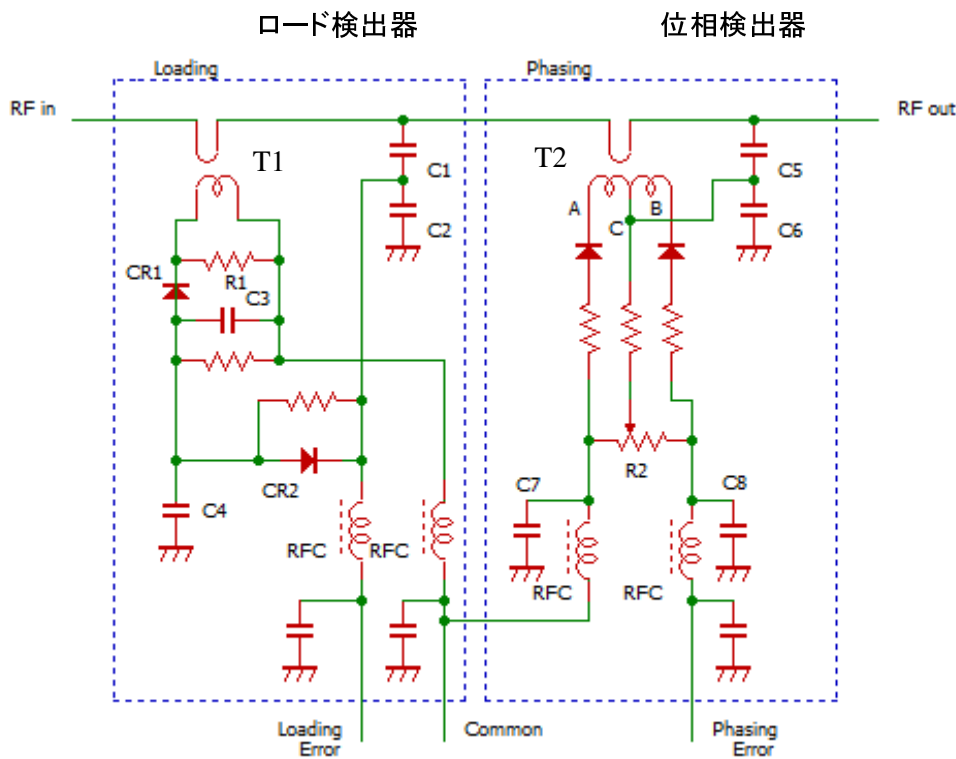
RF電流に比例した電圧がR1の両端に現れ、CR1、C3でDC電圧になります(V_{cu})。

2) RFの電圧はC1とC2で分圧され、CR2、C4でDC電圧に変換されます(V_{rf})。

3) CR1とCR2は逆極性で加算されています。またRFの電圧と電流があらかじめ決められた値の時、すなわち規定負荷の時に“0”Vになるように回路の定数が決められています。

4) したがって例えば負荷が規定負荷よりも小さい場合は、電流が大きくなって $V_{cu} > V_{rf}$ になるので Loading Error の端子電圧はCommon に対して負になります。

5) このようにラインの負荷インピーダンスの大きさが規定負荷インピーダンスと同じ時に、エラーが“0”Vになります。



6.3.2 位相検出器

1) 上図 Phasing の部分です。T2は1次側は1ターン、2次側は必要な巻き数のトランスです。

このトランスで注意すべきことは、2次側のターミネーションが、巻線のリアクタンスに対して高い抵抗であることです。すなわち1次側は電流ドライブ、2次側は電圧を取り出す方式です。

2) このトランスの使用方法では、2次側の電圧は1次側の電流に対して90度位相差が発生します。

また、2次側の A,B の位相差は180度です。ここでA,B の電圧 V_a, V_b は次のようです。

$$V_a = KI \angle (+90 + \theta) + K_1 V \angle 0$$

$$V_b = KI \angle (-90 + \theta) + K_1 V \angle 0$$

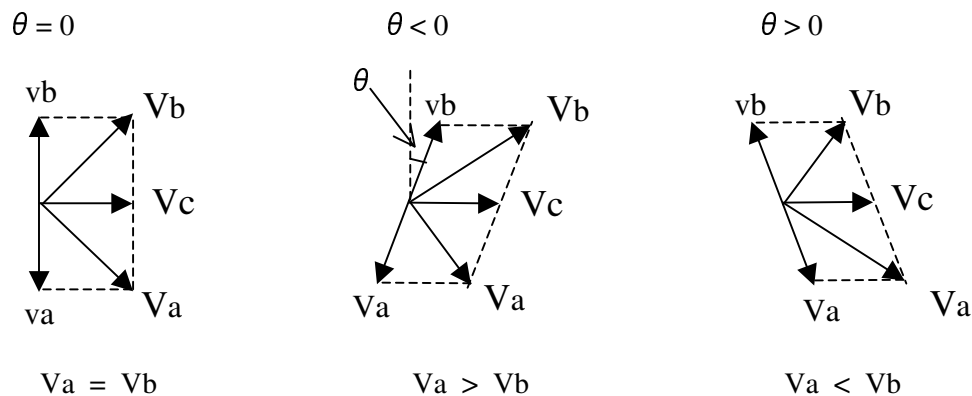
K, K_1 : 比例定数

I : ライン電流

V : ライン電圧

θ : IとVの位相角

ここでRFラインのVとIの位相差が同相($\theta=0$)、ポジティブ($\theta<0$)、ネガティブ($\theta>0$)の場合はA、B点の電圧は電圧サンプル V_c とのベクトル合成で V_a 、 V_b はそれぞれ $V_a = V_b$ 、 $V_a > V_b$ 、 $V_a < V_b$ となります。



結論としてRFラインのVとIに關係が

- 1)同相の場合は、ディスクリの出力は0V。
- 2)位相差があれば、ディスクリの出力は位相差の大きさに比例して電圧が発生します。
また、リアクタンスの極性によって出力電圧の極性も変わります。

1)の場合は負荷が純抵抗、2)の場合は負荷にリアクタンスが含まれます。
そして最終的に両方の出力が0Vになるようにマッチング ネットワークが調整されれば、アンテナと送信機の規定負荷インピーダンス($Z \pm j0$)が整合されます。

6.4 マッチング・ネットワーク

マッチング・ネットワークは今回のテーマから外れますので、別のレポートとします。

ただ、このディスクリを用いた方法では、

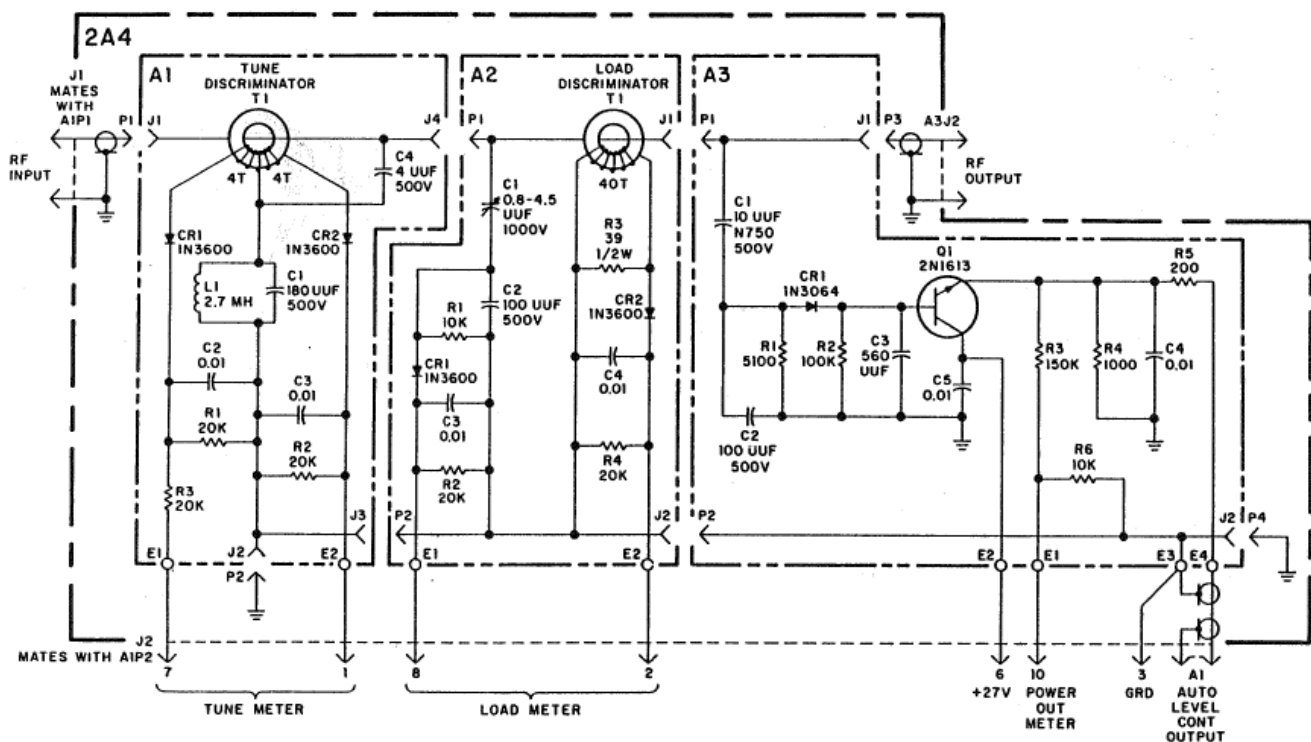
- 1)負荷が容量性か誘導性か、あるいは抵抗のみであるか。
 - 2)負荷が規定のインピーダンスより大きい小さいか、あるいは正しく規定の値になっているか。
- これら2つの判断は付きませんが、現在の状態がどの程度の量ずれているのかはあまり正確には分かりません。

これらの情報からマッチング・ネットワークをサーボ機構等を使用して自動的にチューニングするアルゴリズムは現在勉強中です。

7. 実際の例

7.1 回路図

この例は自動同調では無いのですが、同調およびインピーダンスの検出回路例です。この回路の後にチューナーが付くのですが、そのチューナーのバリコンやコイルを、このTune meter、Load meterを見ながら手で可変して、2つのメーター指示を両方に合わせれば同調作業は終了です。

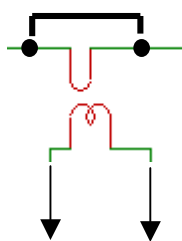


7.2 検出トランス

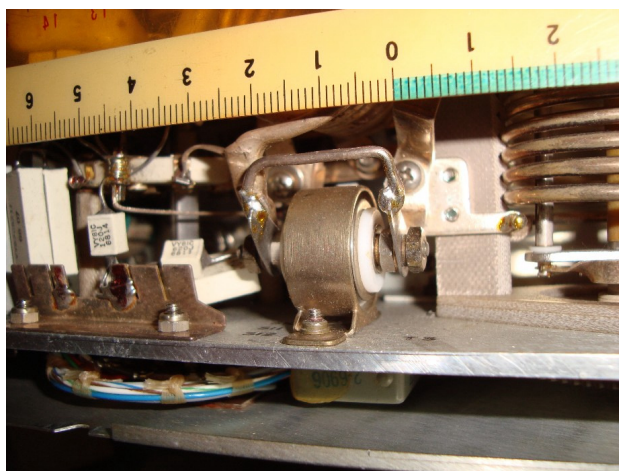
写真はリニアアンプの同調検出のトランスです。終段のπマッチのコイルの電流を検出するものです。アンプはコリンズの548-L4という4CX350F*4本の、1kW出力のアンプです。どうなっているのか興味はありますが、トランスは取り外せない的中を見ることはできません。

トランスの両端をショートしてありますがこれは分流器として動作させています。

ショート(分流器)



シールド線でダイオードに接続



8. まとめ

- 1) 本稿のディスクリミネータは2つの入力を有し、一方はシングルエンド、もう一方はトランス結合で信号が入力され、2つの入力の位相差が90度の時に出力が0Vになるような回路網です。
(ほかにも回路があるかも知れませんが、今回述べた例ではそうです)
同調検出では、いろいろな場所に使用されています。その動作を調べてみました。
- 2) トランスは終端方法によって、電流トランスまたは電圧トランスとして動作します。
電流トランスとしての動作は、1次側の電流に対して同相の電圧を得ることができます。
電圧トランスとしての動作は、1次側の電流に対して90度位相シフトした電圧が得られます。
- 3) これらの2つの特性が重要で、これをうまく利用して、本稿で述べたような動作を実現しています。
- 4) 本稿は動作原理のみです。
実際の設計や回路の実現については一層の配慮が必要です。例えば次のようなことです。
 - (a) 回路自体の動作電圧や使用部品の選定。
 - (b) ディスクリのトランスは重要です。トランスの巻き方、巻き数。コアの選択。周波数特性。ファラデーシールドの有無や方法など。
 - (c) 周波数が広帯域になる場合の周波数特性の補正。回路の迷結合等の対処。
 - (d) サーボモーターを使った場合の、系の安定性。
- 5) 最近では負荷のインピーダンスを直接測定して、その測定値からマッチング・ネットワーク内のL、Cの値をマイコン等で計算して、その値を設定する方法がとられているようです。
ディスクリを使用するのは古い方法です。

参考文献

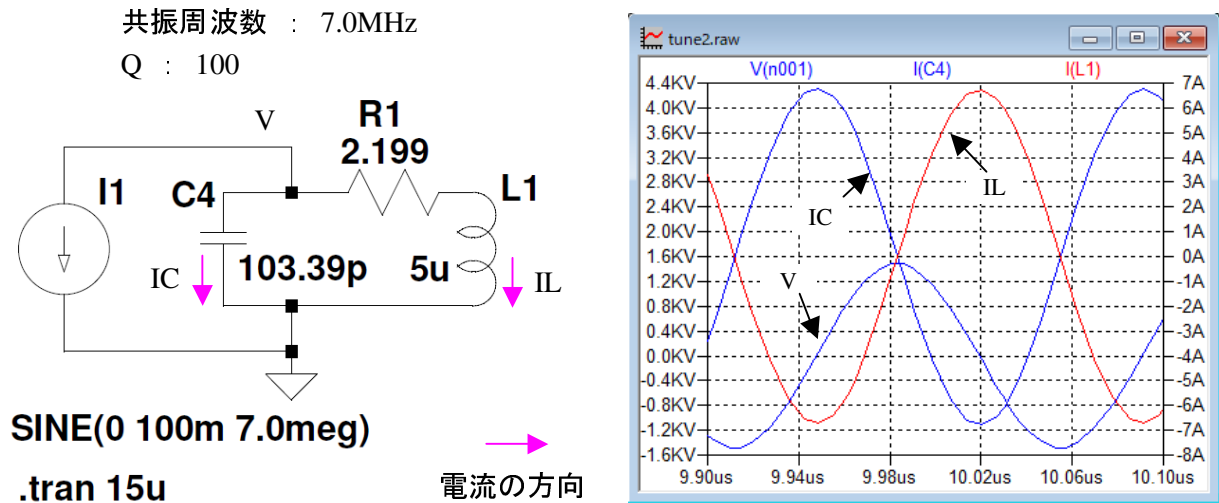
HF Radio System & Circuits Rev. 2nd Ed. William E. sabin , Edgar O. Shoenike
Noble Publishing Corporation ISBN 1-884932-04-5

付1. シミュレーション

結果は分かっていますが、シミュレーションを行いました。

付1.1 共振回路の電圧と電流のシミュレーション

並列共振回路の電圧とコイルの電流のシミュレーションを行ってみました。



- 1) 電圧Vとコイル電流ILは、ILがVに対して90度遅れています。すなわち時間的にVのピークの90度後にILのピークが発生しています。
- 2) 入力周波数と回路が共振しているために ILとICは絶対値が等しく位相差が180度です。
- 3) 細かく言えばR1があるためにILがVに対して正確に90度ではありませんが、R1は一般にL1のリアクタンスより十分小さい値なので、実用上は差支えありません。
- 3) どういう訳か波形の0位置がずれています。 見るときに注意。

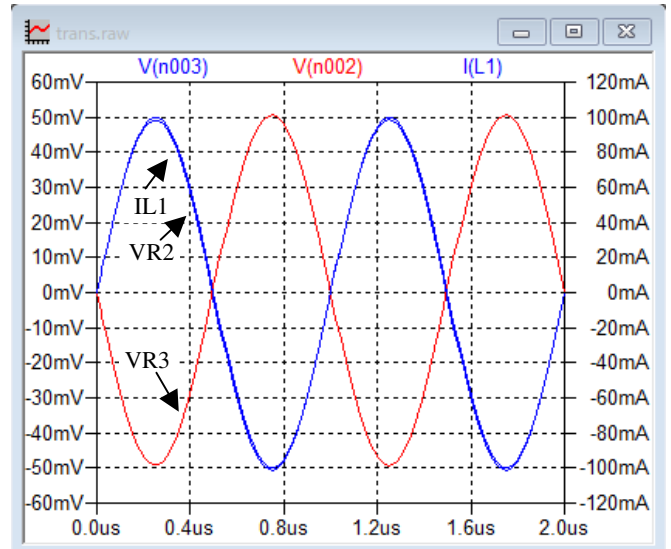
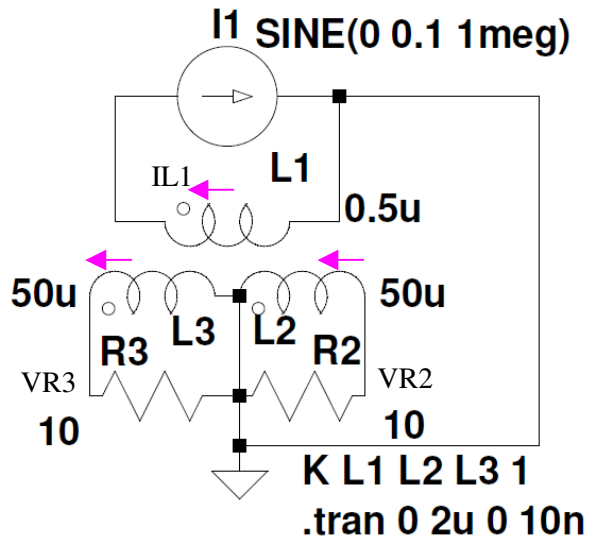
付1. 2 トランスのシミュレーション

付1. 2. 1 電流トランス

1) トランスの2次側にリアクタンスに比較して小さい値の抵抗を接続した場合。 ($\omega L_{2,3} \gg R_{2,3}$)

2) 1次電流と2次電圧の位相は同相。

3) VR2, VR3はR2とR3の電圧。 \rightarrow は電流の向き。



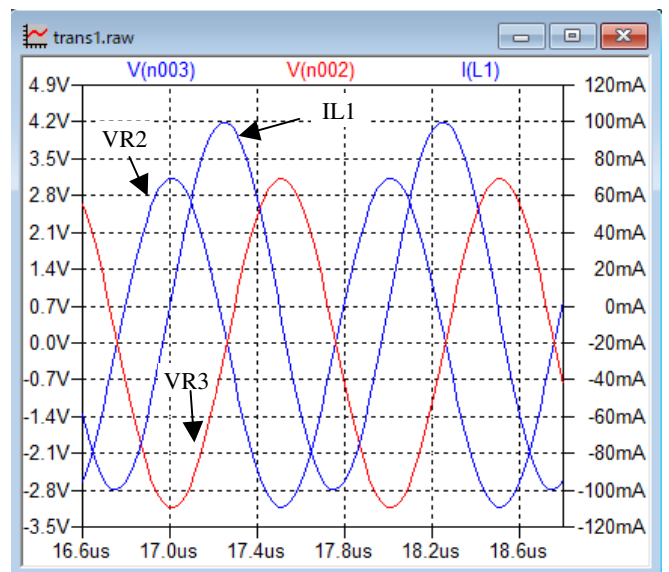
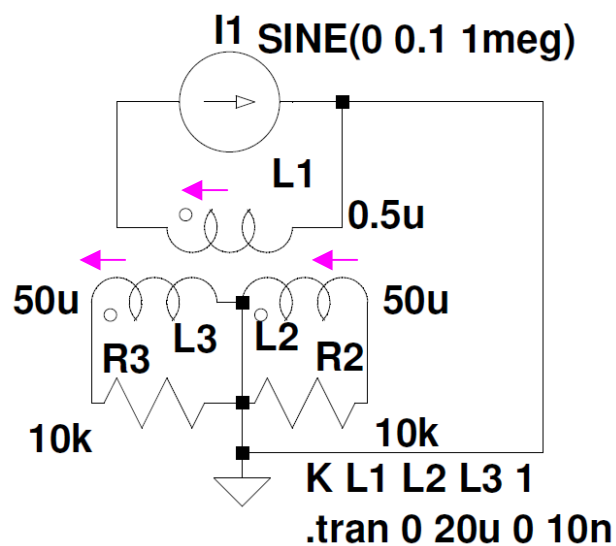
付1. 2. 1 電圧トランス

1) トランスの2次側にリアクタンスに比較して大きい値の抵抗を接続した場合。 ($\omega L_{2,3} \ll R_{2,3}$)

2) 1次電流と2次電圧の位相は90度差です。

3) この電流の向きでVR2はIL1に対して90度進んでいます。(VR2のピークの後、90度遅れてIL1のピークが表れていることで分かります)

4) VR2とVR3は逆相(180度差)になります。



以上