

技術レポート 「RCCトランス設計方法」

1. 概要

補助電源を一例として RCC トランスの設計手順を明確にし、設計方法を記述する。

2. 動作原理

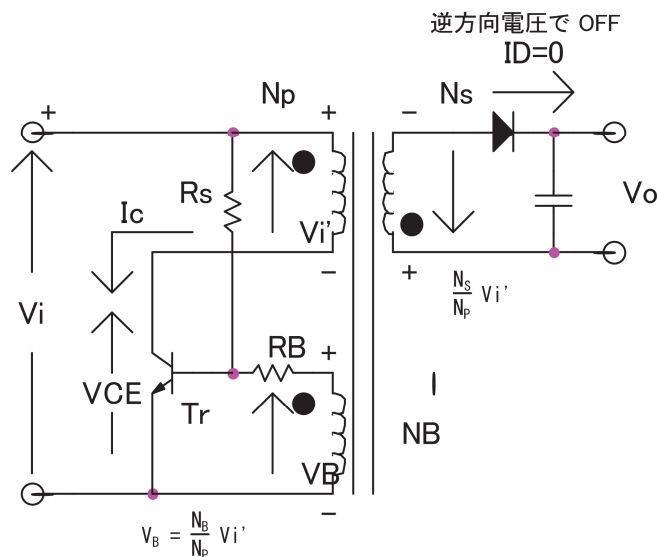


図1 Tr が ON の場合

入力電圧 V_i が印加されると、抵抗 R_S の電流がスイッチング・トランジスタ(Tr)のベースに流れ、トランジスタは ON になる。トランジスタが ON 状態に入ると、トランスの 1 次巻線 N_p に電圧が印加され、同時にベース巻線 N_B にはそれぞれの巻数比に応じた電圧 V_B が発生する。この電圧は、トランジスタをさらに導通させる方向に動作して正帰還の電圧となり、トランジスタは急速に ON してトランスの 1 次巻線には V_i' の電圧が加わって図 1 の状態になる。この場合、2 次巻線の電圧はダイオード D に対して逆方向に加わるので、2 次巻線には電流が流れない。

しかし、トランジスタのコレクタ電流 I_c は 1 次関数的に増加($I_c = \frac{V_i'}{L}t$)するので、ある期間 T_{on} 後に I_c に達すると直流電流増幅率 h_{FE} と間は $h_{FE} \leq (I_c/I_B)$ となりトランジスタがこれ以上 ON 状態が維持できなくなってしまう。これはベース電流不足の領域で、これによってコレクタ電圧は飽和領域からはずれ、増大する。するとコレクタ電圧が増加した事によって、1 次巻線の電圧が低くなり、ベース巻線の電圧も下がりベース電流が減少する。よってトランジスタのベース電流によってトランジスタのベース電流不足状態がさらに助長されトランジスタは急激に OFF し、図 2 の状態になる。

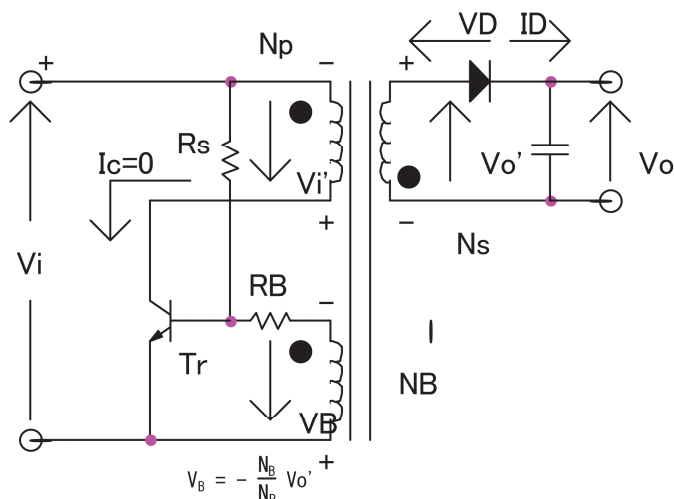


図2 TrがOFFの場合

トランジスタがOFFするとトランスの各巻線には逆起電力が発生し、1次巻線に流れていた電流と同一のアンペア・ターンを保つように、2次巻線にも巻き始めから巻き終りの方向に電流が流れ、ダイオードDが導通し、トランスに蓄積されていたエネルギーを出力側へ供給する。トランスに蓄積されていたエネルギーがすべて出力側へ移されるとダイオードの電流はゼロになり、図3の状態になる。この瞬間、トランスの各巻線電圧はゼロになるが、RBを流れる電流の一部がトランジスタのベース電流となって、トランジスタが導通しコレクタ電流が流れる。この状態が正帰還されると再びトランジスタは急速にON状態となり、図1で示す動作に戻って同じ動作を繰り返し発振を継続する。RCCの動作波形は図4に示す。

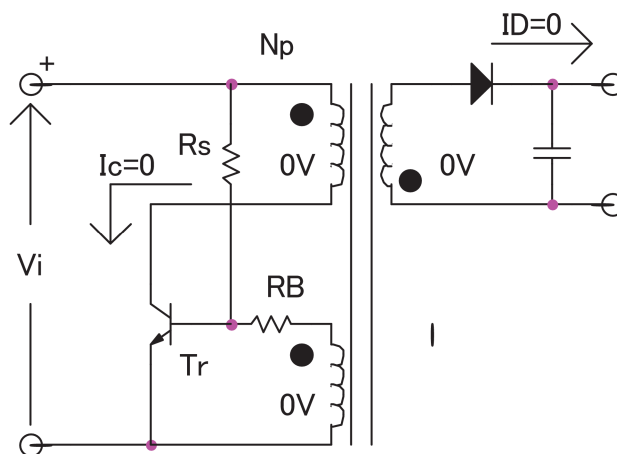


図3 TrがOFFからONになる瞬間

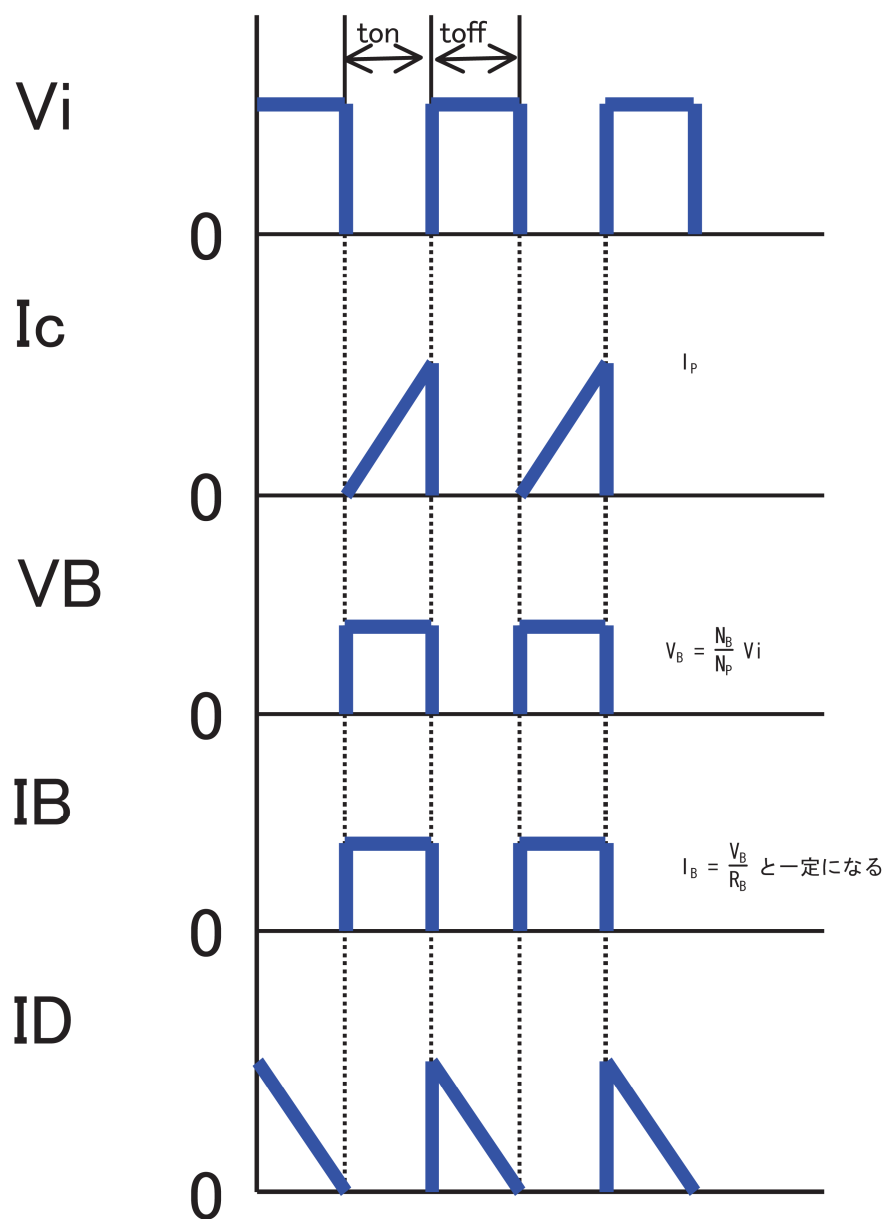


図4 RCC動作波形

2. トランス設計計算例

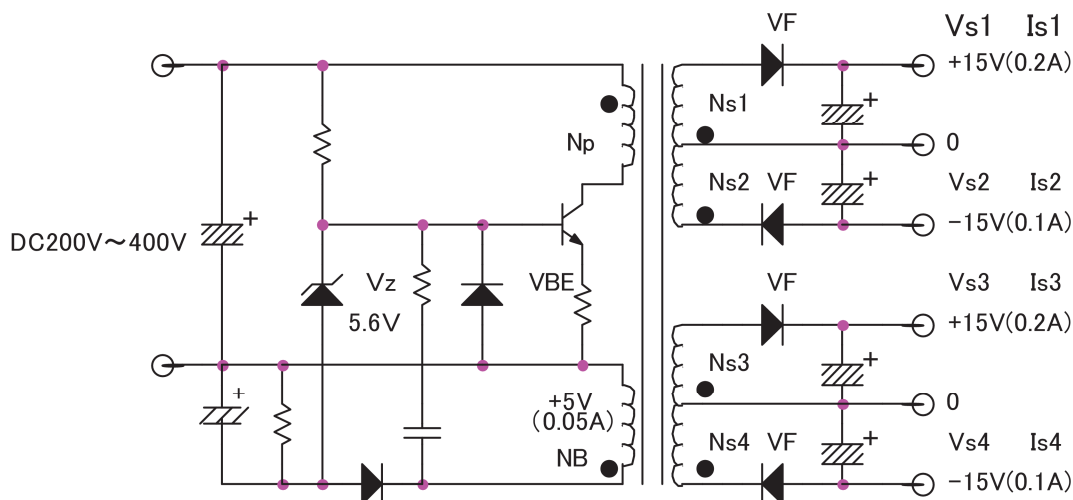


図5 回路例

・トランス仕様

入力: DC200V~400V N_p
 制御: +5V (0.05A) N_B
 出力: +15V (0.2A) N_{S1}
 :-15V (0.1A) N_{S2}
 :+15V (0.1A) N_{S3}
 :-15V (0.05A) N_{S4}
 コア: EER28Z (断面積 $A_e: 82.1\text{mm}^2$)
 周波数: 40kHz
 効率: 70%

① 出力電力 P_o を求める

$$\begin{aligned}
 P_o &= V_B \cdot I_B + V_{S1} \cdot I_{S1} + V_{S2} \cdot I_{S2} + V_{S3} \cdot I_{S3} + V_{S4} \cdot I_{S4} \\
 &= (5V \times 0.05A) + (15V \times 0.2A) + (15V \times 0.1A) + (15V \times 0.1A) + (15V \times 0.05A) \\
 &= 7.75W
 \end{aligned}$$

② 入力電力 P_i を求める (η : 効率)

$$\begin{aligned}
 P_i &= \frac{P_o}{\eta} \\
 &= \frac{7.75W}{0.7} \\
 &= 11.07W
 \end{aligned}$$

③ 1次電流の最大値 I_{1P} を求める (I_{1ave} : 1次電流の平均値)

$$\begin{aligned}
 I_{1P} &= 4 \cdot I_{1ave} \quad (4 \text{ 倍するのは } D=50\% \text{ の時}) \\
 &= 4 \cdot \frac{P_i}{V_i(\text{最低入力電圧})}
 \end{aligned}$$

$$= 4 \times \frac{11.07\text{W}}{200\text{V}}$$

$$= 0.22\text{A}$$

- ④ t_{on} を求める(通常、最低入力電圧時に最大 D が 0.5 になるように設計する)

$$t_{\text{on}} = \frac{D}{f}$$

$$= \frac{0.5}{40\text{kHz}}$$

$$= 12.5 \mu\text{s}$$

- ⑤ 1次巻線 N_p を求める

(ΔB :コアの特性にもよるが通常は過負荷など考慮し 0.2Tesla 以下が好ましい)

$$N_p = \frac{V_i \cdot t_{\text{on}}}{\Delta B \cdot A_e}$$

$$= \frac{200\text{V} \times 12.5 \mu\text{s}}{0.195\text{Tesla} \times 82.1 \times 10^{-6}\text{m}^2}$$

$$= 156\text{T}$$

- ⑥ ベース巻線 N_B を求める (ツェナー電圧 5.6V を考え、 $V_B=5\text{V}$ とする)

$$N_B = \frac{V_B}{V_i} \cdot N_p$$

$$= \frac{5\text{V}}{200\text{V}} \times 156\text{T}$$

$$= 4\text{T}$$

- ⑦ 2次巻線 N_s を求める

V_F :ダイオードの順方向電圧降下(カタログ値参照)

V_Z : ツェナー電圧(カタログ値参照)

V_{BE} :トランジスタ Q のベース・エミッタ間電圧(カタログ値参照)

$$N_s = \frac{V_s + V_F}{V_{BE} + V_Z} \cdot N_B$$

$$= \frac{15\text{V} + 1\text{V}}{0.6\text{V} + 5.6\text{V}} \times 4\text{T}$$

$$= 10\text{T}$$

- ⑧ トランス1次巻線のインダクタンス L を求める

$$L = V \cdot \frac{dt}{di}$$

$$= V_i \cdot \frac{t_{\text{on}}}{I_{1P}}$$

$$= 200\text{V} \times \frac{12.5 \mu\text{s}}{0.22\text{A}}$$

$$= 11.36\text{mH}$$

⑨ ギャップを求める(μ_0 :真空の透磁率)

$$g = \frac{N_p^2 \cdot \mu_0 \cdot Ae}{L}$$

$$= \frac{156T^2 \times 4\pi \times 10^7 H/m \times 82.1 \times 10^{-6} m^2}{11.36mH}$$

$$= 0.22mm$$

⑩ 線径を求める

・ 電流の実効値 I_{rms}

$$I_{rms} [A] = I_{1P} \cdot \sqrt{\frac{D}{3}} \quad ※1$$

$$= 0.22A \times \sqrt{\frac{0.5}{3}}$$

$$= 0.09A$$

※1 実効値 I_{rms}

$$I_{rms} [A] = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{ton} i(t)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \frac{I_p^2}{ton^2} \cdot \left[\frac{t^3}{3} \right]_0^{ton}}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{ton} \left(\frac{I_p}{ton} t \right)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \frac{I_p^2}{ton^2} \cdot \left(\frac{ton^3}{3} - 0 \right)}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{ton} \frac{I_p^2}{ton^2} t^2 dt} = I_p \cdot \sqrt{\frac{ton}{3T}} \quad \left(\frac{ton}{3T} = D \right)$$

$$= I_p \cdot \sqrt{\frac{D}{3}}$$



・ 線径 ϕd を求める(N_p 巻線)

(δ : 電流密度 [A/mm^2] 通常は $3A/mm^2$ が好ましい)

$$\phi d \text{ 電線の断面積 } S : \frac{\pi \times d^2}{4}$$

$$\text{電流密度 } \delta : \frac{I_{rms}}{S}$$

$$\text{より } \delta = \frac{I_{\text{rms}}}{\frac{\pi \times \phi d^2}{4}} \text{ となり}$$

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{I_{\text{rms}}}{\pi \times \delta}}$$

$$\begin{aligned} \phi d &= 2 \times \sqrt{\frac{I_{\text{rms}}}{\pi \times \delta}} \\ &= 2 \times \sqrt{\frac{0.09\text{A}}{\pi \times 3 \text{ A/mm}^2}} \\ &= \phi 0.2\text{mm} \end{aligned}$$

・ 電流の実効値 I_{rms} (N_B 巻線 $I_{\text{ave}} : 0.05\text{A}$)

$$\begin{aligned} I_{\text{rms}} [\text{A}] &= 4 \times I_{\text{ave}} \cdot \sqrt{\frac{D}{3}} \quad \text{※ } I_P = 4 \times I_{\text{ave}} \\ &= 4 \times 0.05\text{A} \times \sqrt{\frac{0.5}{3}} \\ &= 0.082\text{A} \end{aligned}$$

・ 線径 ϕd を求める (N_B 巻線)

$$\begin{aligned} \phi d &= 2 \times \sqrt{\frac{I_{\text{rms}}}{\pi \times \delta}} \\ &= 2 \times \sqrt{\frac{0.082\text{A}}{\pi \times 3 \text{ A/mm}^2}} \\ &= \phi 0.19\text{mm} \end{aligned}$$

・ 電流の実効値 I_{rms} ($N_{S2,S3,S4}$ 巻線 $I_{\text{ave}} : 0.1\text{A}$)

$$\begin{aligned} I_{\text{rms}} [\text{A}] &= 4 \times I_{\text{ave}} \cdot \sqrt{\frac{D}{3}} \\ &= 4 \times 0.1\text{A} \times \sqrt{\frac{0.5}{3}} \\ &= 0.163\text{A} \end{aligned}$$

・ 線径 ϕd を求める ($N_{S2,S3,S4}$ 巻線 $I_{\text{ave}} : 0.1\text{A}$)

$$\begin{aligned} \phi d &= 2 \times \sqrt{\frac{I_{\text{rms}}}{\pi \times \delta}} \\ &= 2 \times \sqrt{\frac{0.165\text{A}}{\pi \times 3 \text{ A/mm}^2}} \\ &= \phi 0.27\text{mm} \end{aligned}$$

・電流の実効値 I_{rms} (N_{S1} 巻線 $I_{ave} : 0.2A$)

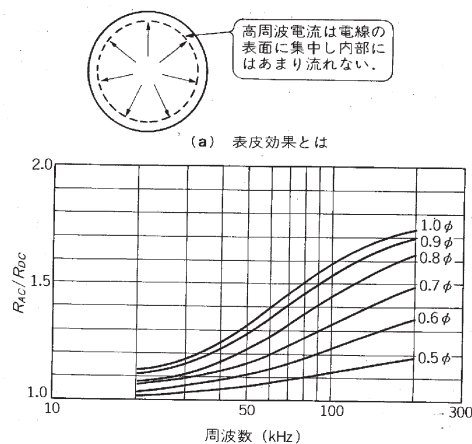
$$\begin{aligned} I_{rms} [A] &= 4 \times I_{ave} \cdot \sqrt{\frac{D}{3}} \\ &= 4 \times 0.2A \times \sqrt{\frac{0.5}{3}} \\ &= 0.327A \end{aligned}$$

・線径 ϕd を求める (N_{S1} 巻線 $I_{ave} : 0.2A$)

$$\begin{aligned} \phi d &= 2 \times \sqrt{\frac{I_{rms}}{\pi \times \delta}} \\ &= 2 \times \sqrt{\frac{0.327A}{\pi \times 3 A/mm^2}} \\ &= \phi 0.38mm \end{aligned}$$

実際電流が大きい場合、かなり太い巻線材料となるため、ボビンの構造、作業性を考慮すると $\phi 0.8$ 以下の巻線材とし多数本線としたほうが、便利である。また高周波になればなるほど表皮効果による損失が大きくなるので、多数本線とするほうがよい。

〈図1-17〉 高周波電流が流れると表皮効果の影響がでる



⑪ 巻線構造

トランスは巻線構造によって特性にも大きな差がでてしまう。特に1次巻線 N_p と2次巻線 N_s との間の結合には注意しなければ行けない。結合度とは、1次巻線で発生した磁束が、2次巻線へ誘導される割合のことで、誘導されない成分を漏れ磁束(リーケージ)という。結合度を上げるには、巻線構造的には2点に注意する必要がある。

・スペース巻 :

各巻線は巻幅いっぱい巻くことで、巻線が少なく巻幅の半分程度で巻き終わってしまうようなときは、1Tごと間隔を空けて巻く。

・サンドイッチ巻き :

多層分割方法で他の巻線を N_p ではさむことによって巻線間の結合度が上昇する。