

### イオンエンジン用電源3

木下@木下電機

以前「イオンエンジン用の高圧電源を作っているんだけど、トランスが熱で落ちちゃってうまく動かないから効率上げて熱で落ちないようにして欲しい」とのご依頼を頂きました。元設計の妥当性が怪しいので、トランスを最初から設計し直します。の続きです。

要求は「24~36V 入力で安定化した DC1,500V(昇圧比約 63 倍) 12mA max を出力する電源の実現。スイッチングコントローラーは客先指定の NJM2369 で効率はなるべく良くしろ。」とのお達しです。

63 倍の昇圧比をフライバックで実現させると SW 素子の耐圧が 1,500V 以上必要になり選択肢が少ないので、トランスの巻数比でさらに昇圧させます。この昇圧比だと SW コントローラーの DUTY も 98%以上が必要になるのでコントローラー自体がありません。

$V_{DSS}$  が 600V の FET ならば SW 電源用にポピュラーで選び放題です、なので昇圧比を 5 倍とすれば FET にかかるフライバックは 300V となって FET の選択肢が増えます。

表 1 NJM2369 スペック抜粋

PWM 比較器部

項 目	記 号	条 件	最小	標準	最大	単位
入カスレッシホールド電圧 (FB 端子)	$V_{TH0}$	duty cycle=0%	—	0.55	0.65	V
入カスレッシホールド電圧 (FB 端子)	$V_{TH50}$	duty cycle=50%	—	0.87	—	V
最大デューティーサイクル	dM	FB 端子=1.2V	55	64	85	%

コントローラーの最大 DUTY の min は 55%ですが日本製デバイスなのでばらつきが標準値に近い所にまとまっていることを期待し DUTY60%で計算しました。スイッチング周波数 30kHz、DUTY60%、入力電圧 24V で出力電力 18W、効率が  $\eta = 80\%$  とすると入力電力は  
 $18W/80\%=22.5W$   
 になるので入力平均電流は  
 $22.5W/24V=0.94A$   
 になります。

フライバックでトランス一次側に流れる電流は図 1 赤線のように三角になるので DUTY60%のピーク電流は

$$2/60\%*0.94A=3.13A$$

30kHz の DUTY60%は 20  $\mu$  sec、インダクタに 24V を加えてから 20  $\mu$  sec の間に  $\Delta 3.13A$  とするインダクタンスは

$$24V/3.13A*20\mu\text{sec}=153\mu\text{H}$$

と求められます。

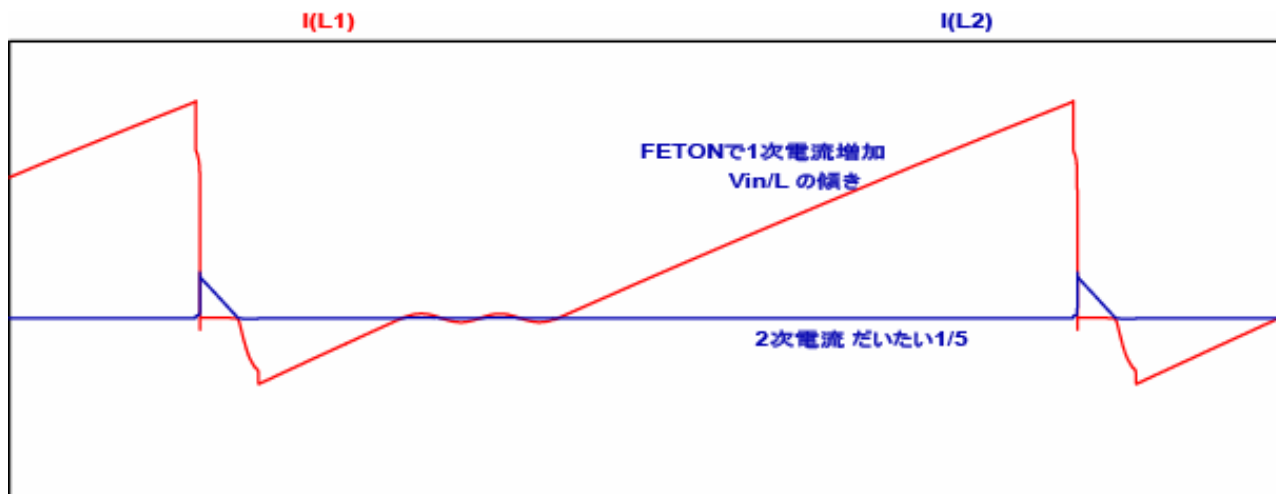


図1 フライバックのインダクタ電流

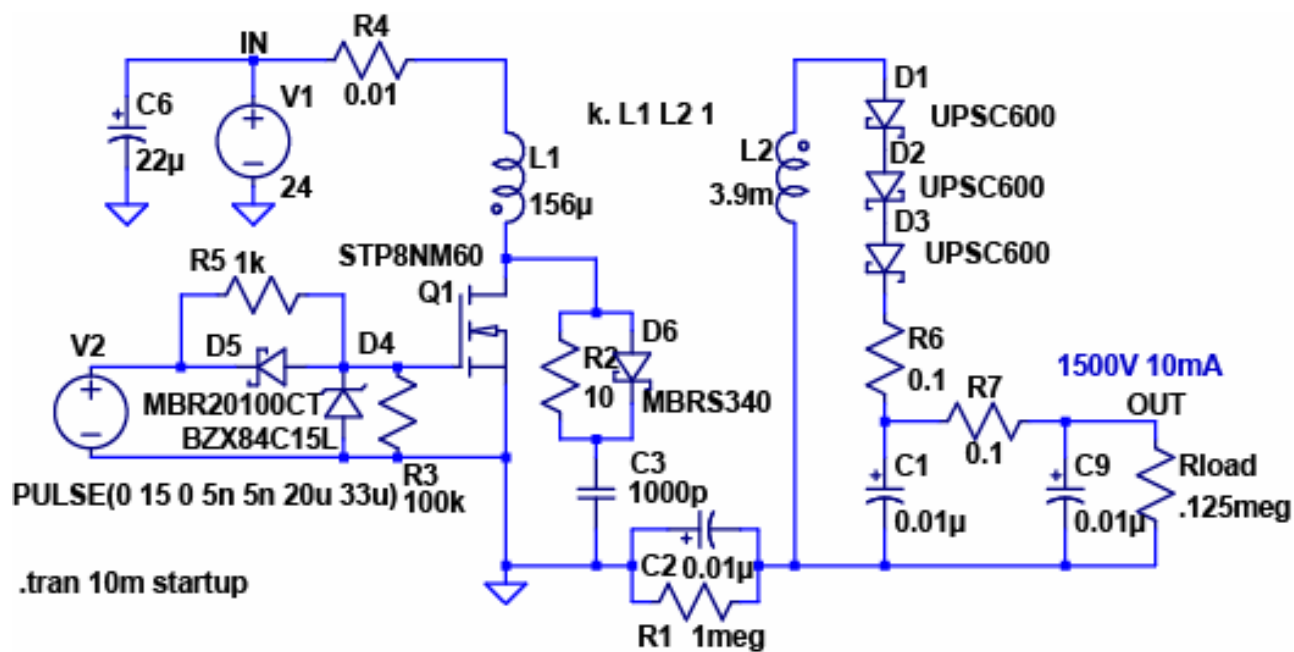


図2 昇圧フライバックシミュレーション回路図

2 次側のインダクタンスは単純に昇圧比の 2 乗で算出しました。

$$156 \mu H * 5^2 = 3.9mH$$

(ここで算出した 153  $\mu H$  でなく 156  $\mu H$  になっているのは実際に巻いたトランスの実測値です。)

すでに機構設計は変更が効かない状況のようで、使うコアのサイズも指定があり TDK PQ32/30 でした。

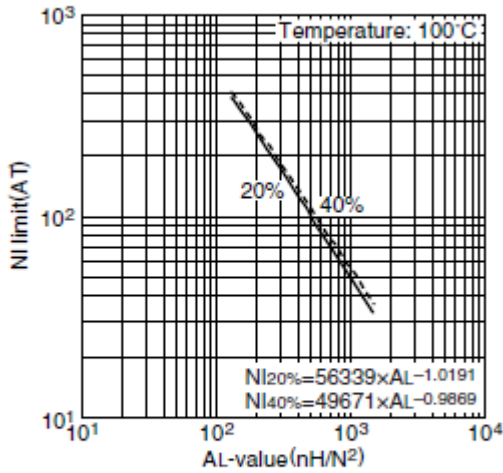
トランスコアのデータシートでは実効磁路長  $L_e$ 、実効断面積  $A_e$  が示されているので、その値を使って磁束密度とインダクタンス係数を算出するのですが、ギャップも含めた便利な係数をメーカーが提供してくれています。

それはギャップ長ごとの  $A_L$  値 (巻数<sup>2</sup> vs インダクタンスの係数) のグラフと、 $A_L$  値と  $NI_{Limit}$  のグラフです。  $NI_{Limit}$  は当該コアの磁束飽和による巻数電流積の上限を示していて、巻線に流す電流が増え巻数電流積が上限に達するとコアの比透磁率が急激に小さくなり、伴ってインダクタンスが小さくなります。 相互インダクタンスも小さくなって巻線がインダクタではなくただの抵抗線と化すのでショート事故となります。

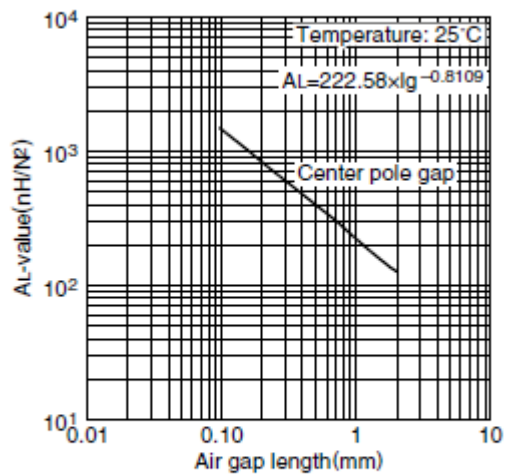
表 2 TDK PC95 PQ32/30 スペック

TDK	
製品名	スイッチング電源用フェライト
シリーズ名	PQ シリーズ
タイプ名	PC95
製品品番	PC95PQ32/30Z-12
製品供給状態	量産体制
鉛フリー有無	Yes
製品発売日付	2004/04/28
製品仕様	
TDK材質名称	PC95
ソフトフェライト材料	Mn-Zn
初透磁率 $\mu_i$	Typ 3300
飽和磁束密度 $B_s$	Typ 410 m T
飽和磁束密度 $B_s$ 測定条件	at.100 degrees Celsius
キュリー温度 $T_c$	Min 215 Cel
製品仕様2	
コア形状	PQ
本体横長さ(L)	Nom 32 m m
本体縦長さ(W)	Nom 22 m m
本体高さ(T)	Nom 30.35 m m
インダクタンス係数 $A_L$	Typ 7000 n H
インダクタンス係数 $A_L$ 測定条件	1kHz, 0.5mA (ALC=ON), 100Ts
磁心定数 $C_1$	Nom 0.464 m m**1
実効断面積 $A_e$	Nom 161 m m**2
実効磁路長 $l_e$	Nom 74.6 m m
実効体積 $V_e$	Nom 12000 m m**3
最小断面積 $A_{min}$	Nom 137 m m**2
巻線断面積 $A_{cw}$	Nom 149.6 m m**2
重量	Nom 44 g

NI limit vs. AL-value (代表例)  
PC95PQ32/30 コア (ギャップ付)



AL-value vs. エアギャップ長 (代表例)  
PC95PQ32/30 コア



Note: このグラフに示されている境界線は、磁束に対する励磁電流の変化が直線である部分を延長し、それが20%および40%はずれた時の磁界の強さとAL-valueの関係を表わします。

測定条件  
 • コイル：φ0.4 2UEW 100Ts  
 • 周波数：1kHz  
 • 電流：0.5mA

図3 コアのギャップ対 AL 値、NI<sub>Limit</sub> グラフ

最終的にこの図3で NI<sub>Limit</sub> 値を超えていないか確認します。

と、そのまえに1次側の巻数の目安を建てなければいけません。

ファラデーの式

$$\Delta B = V_{in} \cdot t_{on} \cdot N^{-1} \cdot A_e^{-1} (T)$$

を変形して

$$N = V_{in} \cdot t_{on} \cdot \Delta B^{-1} \cdot A_e^{-1} (\text{巻})$$

この式は透磁率に関わりなく使えます。

コアの PC95 PQ32/30 データシートから飽和磁束密度が 0.41T なので上限を 0.2T までとして  
 $24V \cdot 20 \cdot 10^{-6} \text{sec} \cdot (0.2T \cdot 161 \cdot 10^{-6})^{-1} = 15 (\text{巻})$

どうして磁束密度に 100% マージンをもたせたかということ、実際に電線をボビンにピッタリ巻いた際にちょうど算出した巻数に巻けないからということ、入力電圧が高い場合、SW コントローラーのばらつきで最大 DUTY が 80% まで大きくできる可能性もあるからです。

ここで PQ32/30 用のボビンでは巻幅が 18.6mm あります。平均電流 0.94A を電線の電流密度を 3A/m<sup>2</sup> とすると電線の断面積が 0.3mm<sup>2</sup> ほど必要です。この条件も含めて 2UEW φ0.45 を 2 パラで巻くとちょうど 18 回巻けるようですのでこれに決めます。

(実際には電線の総太さのバラ付きや電線のクセでピッタリ巻けない場合があるようで「計算より 1T 程度少なくなる」とトランスを制作していただいたポニー電機さんからの指摘がありました。)

18 回巻いたときのインダクタンスを 153 μH にするためコアにギャップを入れます。

この時の巻数とインダクタンスの比を示す AL 値は

$$153 \cdot 10^{-6} / 18^2 = 472 (\text{nH/N}^2)$$

図 3 の右側の式からギャップ長

$$L_g = (472/222.58)^{-1/0.8109} = 0.395(\text{mm})$$

と算出できます。

この時、飽和磁束密度へのマージンは図 3 を用いて算出され

$NI_{20\%}$  への余裕度は図 3 左の式から

$$NI_{20\%} = 56339 * 472^{-1.0191} = 106(\text{AT})$$

$$NI_{40\%} = 49671 * 472^{-0.9869} = 114(\text{AT})$$

なので 18 巻に 3.13A 流して 56.3(AT)となり、 $NI_{20\%}$  に対して 53%に収まっています。

また最大電流が流れる条件として  $L=153 \mu\text{H}$ 、 $V_{in}=36\text{V}$ 、DUTY80%で ON 時間が  $26.7 \mu\text{sec}$

$$26.7 * 10^{-6} * 36\text{V} / (153 * 10^{-6}) = \text{ピーク電流 } 6.2\text{A}$$

が考えられます。

18 巻\*6.2A で 112(AT)になって表からは  $NI_{20\%}$  は超えているけれど  $NI_{40\%}$  は超えていないですから、通常の運転条件ではトランスコアの飽和磁束密度を超えることによる事故に至ることはないでしょう。

フライバックの 2 次側は電圧が高いことを除けば単純に 5 倍巻けば良いです。、電流も 12mA と少なめなので、ボビンにちょうど巻ける電線を探します。3 層絶縁電線 TEX-E を採用して層間の絶縁紙を省略します。φ0.2mmの TEX-E 電線の仕上がりはφ0.41mm とのことですので、45T を 2 段巻いて合計 90T としました。

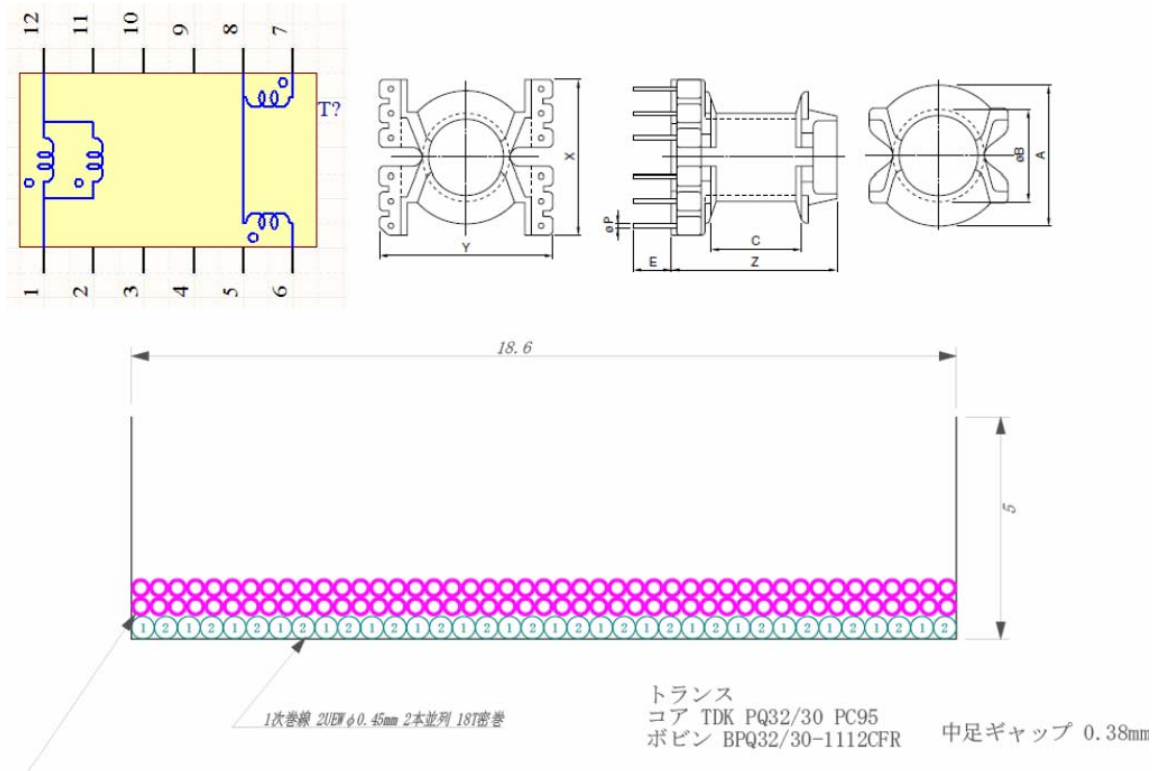


図 4 トランスの製作指示書