

也谈 $L-C$ 恒流充电机主电路的设计计算

——与孙乃庚同志商榷

韩志敏

(上海科学仪器厂)

提要: 本文根据 $L-C$ 变换器的工作原理, 从回路具有的品质因素 Q 值出发, 推导出了适用的设计公式。

On "Design and calculation of power supply circuit for a $L-C$ constant-current charges"

——A discussion with comrade Sun Naigen

Han Zhimin

(Shanghai Factory of Scientific Instrument)

Abstract: According to the principle of $L-C$ converter, applicable formulas have been derived based on the quality factor Q of the circuit.

孙乃庚同志在“ $L-C$ 恒流充电机主电路的设计计算”一文(刊登在《激光》, 1982, 9, No. 9, 609.)中, 对其中主回路 $L-C$ 变换器的设计, 只考虑了回路所必须的电感量 L 值, 这对一个以 $L-C$ 串联谐振原理为工作基础的 $L-C$ 变换器来说, 显然是不够的。对变换器来说, 根据最大负载要求, 它不仅应具有一定的电感量 L 值(确保变换器在开路情况下, 使其工作于谐振状态), 而且根据负载电流恒定度和电路效率要求, 它还要具有一定的回路品质因数 Q 值和尽量大的耦合系数 K_c 值, 只有满足这两个条件, 才能得到性能好的 $L-C$ 恒流充电机。因此, 在对 $L-C$ 变换器的设计中, 必须同时考虑满足这两个条件。

T 型 $L-C$ 变换器的设计

1. 回路参数计算

由[2]、[3]的分析可知, 在理想情况下, 即 $Q \rightarrow \infty$ 及 $K_c = 1$ 时, $L-C$ 变换器的输出电流 $I_2 = \frac{U_1}{2\omega L}$ 。但当在 $Q \gg 1$ 及 $K_c \approx 1$ 时, 我们认为这一公式仍然近似地成立, 可以采用。那么

$$\text{回路电感量} \quad L = \frac{U_1}{2\omega I_2} \quad (1)$$

$$\text{回路电容量} \quad C = \frac{1}{\omega^2 L} \quad (2)$$

收稿日期: 1983年5月31日。

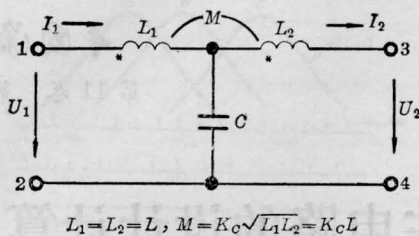


图1 L-C 变换器原理线路图

$$\text{回路品质因数 } Q = \frac{Q_L Q_C}{Q_L + Q_C} \quad (3)$$

式中 ω ——变换器输出开路时的谐振角频率, 即变换器的工作角频率,

$$\omega = 2\pi f;$$

Q_L ——回路电感的品质因数,

$$Q_L = \frac{\omega L}{r}; \quad (4)$$

r ——电感器的损耗电阻。

Q_C ——回路电容器的品质因数,

$$Q_C = \frac{1}{\text{tg } \delta} \quad (5)$$

$\text{tg } \delta$ ——电容器的损耗角正切值。

根据计算出的电容器的容量, 选择产品手册中容量接近的电容器, 调整电感量使回路谐振于工作频率, 但应保证所需的输出电流 I_2 值。

回路的品质因数 Q 值在等于或大于 20, 即 $Q \geq 20$ 时, 该方案的优越性显著。然而当要求变换器的输出电流较大或对恒流要求不太高时, Q 值可适当降低, 但应满足 $Q \gg 1$ 的条件, 所以一般应使 $Q \geq 10$ 。

2. 回路电感 L 的设计

根据对回路品质因数 Q 值的要求, 由式 (3) 求出回路电感 L 的品质因数

$$Q_L = \frac{Q Q_C}{Q_C - Q} \quad (6)$$

(1) 铁芯选择

对工作于 50 赫和 400 赫的 $L-C$ 变换器, 铁芯材料选用 D340-0.35 的标准铁芯, 采用由两个 C 型铁芯叠合在一起构成的 ED 型铁芯。

为加大耦合, 得到接近于 1 的耦合系数,

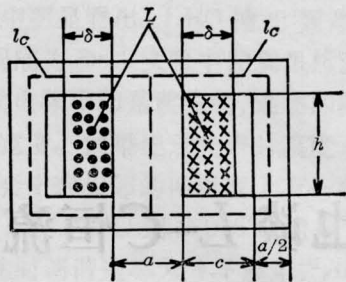


图2 磁路结构和线圈结构

线圈采用双线并绕, 磁路结构和线圈结构示于图 2。该线圈结构的耦合系数 $K_c > 0.95$, 而近似等于 1, 即 $K_c \approx 1$ 。[1] 中采用的线圈结构, 一般 $K_c = 0.8$ 左右。

由于工作时无直流存在, 不存在直流磁化问题, 所以不采用 [1] 中的非磁性间隙办法, 这样可得到大的导磁系数 μ , 而缩小线圈体积, 利用调整线圈圈数的办法来调整线圈的电感量。

从提高线圈的品质因数 Q_L 值出发, 根据经验应使

$$h/\sqrt{2}a = 1 \sim 1.2$$

(2) 导线直径选择

由式 (4) 可求出线圈中的损耗电阻

$$r = \frac{\omega L}{Q_L}$$

式中 r 应包括导线的直流电阻 r_L 和铁芯及介质的等效损耗电阻 $r_{\text{铁}}$, 即 $r = r_L + r_{\text{铁}}$ 。但对 D340-0.35 硅钢带铁芯, 在 50 赫与 400 赫的频率下工作, 损耗很小, 与导线的损耗相比可以忽略, 即 $r_L \gg r_{\text{铁}}$, $r \approx r_L$, 所以在此仅考虑导线的直流电阻。

线圈的导线直径应根据线圈中的最低损耗 (即由线圈的品质因数 Q_L 值所确定的允许损耗电阻值 r) 和允许电流密度 J 确定, 这将使设计复杂化。通常在工程设计时, 首先从允许电流密度 J 出发, 计算出导线直径和线圈参数, 然后再验算所求出的损耗电阻值, 它应小于允许的损耗电阻值, 否则应重新选定电流密度 J 进行计算, 反复核算, 直到达到要求为止。

由于在 $Q \rightarrow \infty$ 及 $K_c=1$ 时, 变换器的输出电流 I_2 与输入电流 I_1 互相垂直且相等, 所以两线圈选用相同直径的导线。导线直径为:

$$d = 1.13 \sqrt{\frac{I_2}{J}} \text{ (毫米)} \quad (7)$$

式中 J ——导线的电流密度, 一般取 2.5 安/毫米²;

I_2 ——变换器的输出电流, 单位为安培。

然后在线规表中, 查出与计算值 d 相近导线直径的导线, 作为暂定的导线进行计算。

(3) 线圈的结构设计

由电感 $L = \mu L_0 = \mu \frac{1.256 W^2 S_c}{l_c} \times 10^{-8}$ (亨)

求出线圈圈数

$$W = 8.92 \times 10^3 \sqrt{\frac{L l_c}{\mu S_c}} \text{ (圈)} \quad (8)$$

式中 S_c ——铁芯中间的净截面积, $S_c = a^2$, 单位厘米²;

l_c ——铁芯平均磁路长度, 单位为厘米;

μ ——导磁系数, 单位为高斯/奥斯特。

$\mu = \frac{B_m}{H_m}$, 其值由 D 340-0.35 铁芯工

作频率的 B_m-H_m 曲线上的工作点求出, 即求出所选工作点处的 μ 值。工作点一般选在曲线的拐点处(如图 3 上的 D 点), 这将使其既工作在线性段, 又可得到高的 μ 值, 还不会

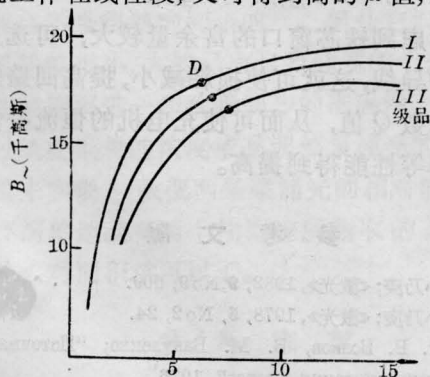


图 3 D340-0.35 的 50 赫磁化曲线

进入饱和区。

然后利用式 $H_m l_c = I_2 W$ 来验算一下工作点。由于材料的差异性等原因, 只要该关系式近似相等就可以了。若相差太大, 可选另一磁路长度 l_c 规格的铁芯, 用不同的 l_c 来达到调整工作点的目的。

$$\text{每层匝数} \quad n \approx \frac{h}{2 \times d_m \times K_A} \quad (9)$$

式中 d_m ——导线绝缘层的外径, 单位毫米;

K_A ——排绕系数, 一般取 1.05;

h ——底筒高度, 单位毫米;

$$\text{线圈的层数} \quad N = \frac{W}{n} \quad (10)$$

线圈的厚度

$$\begin{aligned} \delta &= d_m \times N \times K_B \times 10^{-1} + \text{绝缘层厚度} \\ &\approx d_m \times N \times K_B \times 10^{-1} \text{ (厘米)} \end{aligned} \quad (11)$$

式中 K_B ——叠绕系数, 一般取 1.15。

(4) 导线的直流电阻

线圈的平均匝长 $l_n = 4 \times (a + \delta)$ (厘米) (12)

导线的总长度 $l = l_n \times W \times 10^{-2}$ (米) (13)

导线的直流电阻 $r = l \times 10^{-3} \times r_0$ (欧姆) (14)

式中 r_0 ——导线每千米电阻(欧姆/千米)。

此时计算出的电阻 r 值, 应小于设计的允许值, 否则取较小的 J 值, 重新计算。

(5) 铁芯窗口核算

计算出的线圈厚度 δ 应小于 C , 即 $\delta < C$, 否则要选大一规格的铁芯重新计算。

实 例

一台工作于 50 赫工频电网的 CO_2 激光器的 $L-C$ 型恒流充电机, 根据负载要求 $L-C$ 变换器的输出电流为 3 安培, 计算该变换器的参数。

1. 回路参数计算

由于输入电压 $U_1 = 220$ 伏, $\omega = 314$, 则

$$L = \frac{U_1}{2\omega I_2} = \frac{350}{I_2} = \frac{350}{3} = 116.6 \text{ (毫亨)}$$

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} = \frac{10.14 \times 10^3}{L}$$

$$= \frac{10.14 \times 10^3}{116.6} = 87 \text{ (微法)}$$

选无锡电力电容器厂生产的标准系列产品交流电容器 CZJN-100 微法 $\pm 10\%$ -1 千伏, 该电容器的损耗角正切值为 $\text{tg } \delta = 0.03$,

$$\text{那么 } Q_C = \frac{1}{\text{tg } \delta} \approx 33.$$

考虑到电容器的耐压问题, 应加保护措施, 确保电容器在工作期间不致击穿损坏。

根据已选取的电容器的容量, 重新计算回路电感 L , 即 $C = 100$ 微法, 则 $L = \frac{1}{\omega^2 C} = 101.4$ (毫亨)。

验算变换器的输出电流 I_2 :

$$I_2 = \frac{U_1}{2\omega L} = 3.45 \text{ (安培)} > 3 \text{ 安培}.$$

由于变换器的输出电流不大, 且考虑到充电机的恒流性能等, 选取 $Q = 20$ 。

2. 回路电感 L 的设计

$$Q_L = \frac{QQ_C}{Q_C - Q} = \frac{20 \times 33}{33 - 20} = \frac{660}{13} \approx 51$$

(1) 铁芯选择

根据生产中铁芯材料的来源, 选用 D 340-0.35-II。

由于回路工作电流不大, 选用两个 CD25 $\times 50 \times 80$ 的标准铁芯组成 ED 型。由铁芯规格表查得: $C = 40$ 毫米, $h = 78$ 毫米, $l_c = 31.5$ 厘米, $a = 5$ 厘米; 那么 $S_c = a^2 = 25$ 厘米²。

(2) 导线直径选择

当选取 $J = 2.5$ 安/毫米²时,

$$d = 1.13 \sqrt{\frac{I_2}{J}} = 1.13 \sqrt{\frac{3.45}{2.5}} \\ = 1.13 \times 1.175 = 1.33 \text{ (毫米)}$$

从国产漆包铜线规格表中, 选取相近铜芯标称直径 $d = 1.35$ 毫米的铜导线, 并查得该漆包铜线的最大外径 $d_m = 1.43$ 毫米, 每千米的直流电阻 12.3 欧姆/千米。

(3) 线圈的结构设计

在图 3 的 D 340-0.35-II 的 50 赫磁化曲线上选取工作点 D , 由曲线求出该点的导磁系数 μ 值:

$$\mu = \frac{B_{\sim}}{H_{\sim}} = \frac{17 \times 10^3}{6.3} = 2700 \text{ (高斯/奥斯特)}$$

$$\text{那么线圈圈数 } W = 8.92 \times 10^3 \sqrt{\frac{Ll_c}{\mu S_c}} = 8.92 \\ \times 10^3 \sqrt{\frac{101.4 \times 10^{-3} \times 31.5}{2700 \times 25}} \approx 61 \text{ (圈)}$$

$$\text{验算工作点: } H_{\sim} l_c = 6.3 \times 31.5 = 198$$

$$I_2 W = 3.45 \times 61 = 210$$

即认为 $H_{\sim} l_c \approx I_2 W$, 那么该规格铁芯和工作点是合适的。

每层匝数

$$n = \frac{h}{2 \times d_m \times K_A} = \frac{78}{2 \times 1.43 \times 1.05} = 26$$

$$\text{线圈层数 } N = \frac{W}{n} = \frac{61}{26} = 2.35 \approx 3$$

线圈厚度

$$\delta \approx d_m N K_B \times 10^{-1} = 1.43 \times 3 \times 1.15 \\ \times 10^{-1} \approx 0.5 \text{ (厘米)}$$

(4) 导线的直流电阻

$$l_n = 4 \times (a + \delta) = 4 \times (5 + 0.5) = 22 \text{ (厘米)}$$

$$l = l_n W \times 10^{-2} = 22 \times 61 \times 10^{-2} = 13.4 \text{ (米)}$$

$$r = l \times 10^{-3} \times r_0 = 13.4 \times 10^{-3} \\ \times 12.3 = 0.165 \text{ (欧姆)}$$

验算损耗电阻

设计允许的损耗电阻

$$r = \frac{\omega L}{Q_L} = \frac{314 \times 101.4 \times 10^{-3}}{51} = 0.624 \text{ (欧姆)},$$

而线圈的损耗电阻 $r \approx 0.165$ 欧姆 < 0.624 欧姆, 所以所选导线是合适的。

(5) 铁芯窗口核算

$$\delta = 0.5 \text{ 厘米} < 4 \text{ 厘米} = C$$

考虑到铁芯窗口的富余量较大, 可选用较粗的导线, 这就可使损耗减小, 提高回路的品质因数 Q 值, 从而可使充电机的恒流特性和效率等性能得到提高。

参 考 文 献

- [1] 孙乃庚;《激光》, 1982, 9, No 9, 609.
- [2] 孙乃庚;《激光》, 1978, 5, No 2, 24.
- [3] И. В. Волков, В. М. Вакуленко; "Источники электропитания лазеров", 1976.