

关于 L-C 恒流充电的一些问题

Abstract: This paper describes how to choose reasonably the range of quality factor Q in L-C constant charge. An example is given which further proves that it is unreasonable to choose high Q .

文献[3]认为, 电抗器的 Q 和 K_c 值要很高(例如 $Q > 51$, $K_c = 0.95$), “才能得到性能很好的恒流充电机”, “L-C 恒流充电方案的优越性才能显著”。但是, Q 和 K_c 升高之后, 效率和恒流度到底升高多少? 随之而来的其他变化又是什么? 他并没有加以论述。下面我就来谈谈这方面的几个问题。

一、 Q 和 K_c 对效率的影响

由文献[1]可知, L-C 变换器的负载为电阻 R_H 时, 能量转换效率为:

$$\eta \approx \frac{\nu Q (K_c + 1)}{\nu^2 + \nu(1 + K_c)Q + 1} \quad (1)$$

效率随 Q 的增长率为:

$$\frac{d\eta}{dQ} = \frac{\nu(\nu^2 + 1)(K_c + 1)}{[\nu^2 + \nu(K_c + 1)Q + 1]^2} \quad (2)$$

式中 $\nu = R_H / RQ(K_c + 1)$, R 为电抗器输入绕组的电阻。由(2)式可见, Q 值愈大, 效率的增长率愈小。

表 1 不同负载下, 效率 η 与 Q 和 K_c 的关系

Q	$\eta(\%)$					
	$\nu=1$			$\nu=0.5$		
	K_c		K_c	K_c		K_c
	1.0	0.95	0.85	1.0	0.95	0.85
5	83.3		82.2			
10	90.9	90.7	90.2	88.9	88.6	88.1
15	93.8	93.6	93.3	92.3	92.1	91.7
20	95.2	95.1	94.9	94.1	94.0	93.7
25	96.2	96.1	95.9	95.2	95.1	94.9
30	96.8	96.7	96.5	96.0	95.9	95.7
40	97.6	97.5	97.4	97.0	96.9	96.7
50	98.0	98.0	97.9	97.6	97.5	97.4

由于 K_c 介于 $0.8 \sim 0.95$ 之间, ν 介于 $0 \sim 1$ 之间, 所以当 Q 高到一定数值时, 就可以认为效率增长率随 Q 的平方成反比例下降。不难看出, K_c 对效率的影响是完全相似的。

我们根据(1)式算出几组数据, 列于表 1。并根据这些数据作出几组曲线, 如图 1 和图 2 所示。

从图 1 和图 2 可以看到, $Q > 20$, $K_c > 0.85$ 以后, 效率的增长趋以缓慢, 呈饱和状态。例如当

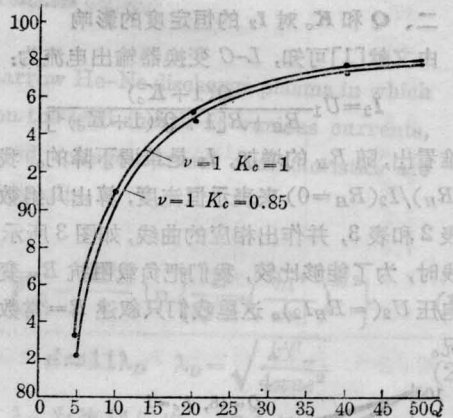


图 1 效率 η 随 Q 的变化

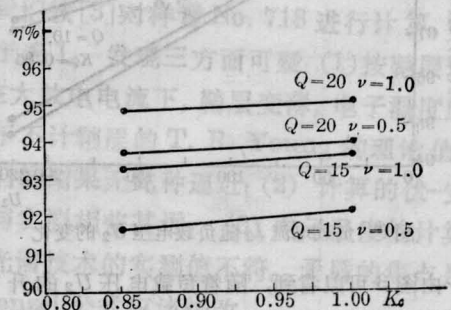


图 2 效率 η 随 K_c 的变化

表2 $Q=18, R=1.8\Omega, U_1=220V$ 时, I_2 与 R_H 的关系

K_c	1.0					0.85					
	R_H (Ω)	0	20	40	60	66.7	0	20	40	60	61.8
I_2 (A)	3.392	3.363	3.335	3.307	3.298	3.667	3.631	3.595	3.560	3.557	
$I_2(R_H)/I_2(R_H=0)(\%)$	100	99.1	98.3	97.5	97.2	100	99.0	98.0	9.71	9.70	
$U_2=I_2R_H$ (V)	0	67.2	133.4	198.4	220	0	72.6	143.8	213.6	220	

表3 $Q=10, R=1.8, U_1=220V$ 时, I_2 与 R_H 的关系

K_c	1.0					0.85					
	R_H (Ω)	0	10	20	30	38	0	10	20	30	35.3
I_2 (A)	6.096	6.013	5.932	5.853	5.791	6.587	6.482	6.381	6.282	6.231	
$I_2(R_H)/I_2(R_H=0)(\%)$	100	98.5	97.3	96.0	95.0	100	98.4	96.9	95.4	94.6	
$U_2=I_2R_H$ (V)	0	60.13	118.6	175.6	220	0	64.8	127.6	188.5	220	

$\nu=1, K_c=0.95$ 时, Q 从 5 上到 20, 效率相应地增长 11.9%, 而 Q 从 20 上升到 40 时, 效率只增加 2.4%。在同一个 Q 值下, 不论负载的变化如何, K_c 在 0.85 到 1 之间变化时, 效率的增长都是微乎其微的。

二、 Q 和 K_c 对 I_2 的恒定度的影响

由文献[1]可知, $L-C$ 变换器输出电流为:

$$I_2 = U_1 \frac{Q(1+K_c)}{R_H + R[1+Q^2(1+K_c)^2]} \quad (3)$$

不难看出, 随 R_H 的增加, I_2 是单调下降的。我们用 $I_2(R_H)/I_2(R_H=0)$ 来表示恒流度, 算出几组数据列于表 2 和表 3, 并作出相应的曲线, 如图 3 所示。作曲线时, 为了能够比较, 我们把负载阻抗 R_H 变为负载电压 $U_2 (=R_H I_2)$ 。这里我们只叙述 $R=$ 常数时的情况。

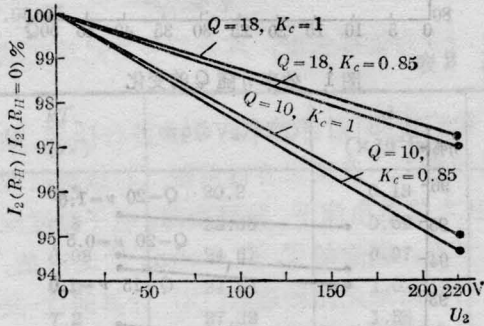


图3 负载电流 I_2 随负载电压 U_2 的变化

由图 3 可以看到, 随着负载电压 U_2 的升高 I_2 是下降的, 下降的百分数随 Q 和 K_c 减小而增大。其中 K_c 的影响是很小的: $Q=18$ 时, 最大下降 0.2%;

$Q=10$ 时, 最大下降 0.4%; Q 的影响明显一些, 但最大下降也只有 2.2% ($K_c=1$) 和 2.4% ($K_c=0.85$)。

但是, 这里需要强调指出的是, Q 和 K_c 适当降低一些也是有好处的。例如, $Q=18$ 时, K_c 从 1 降到 0.85, 虽然使效率降低 0.4% 左右 (见表 1), I_2 最大下降 0.2%, 但却带来了较大的好处。比较一下表 2 和表 3 中的 I_2 就可以知道, 输出功率升高 8%。如果保持输出功率不变, 那么计算表明, 谐振电容容量将下降 8%, 同时 Q 值相应地从 18 上升到 19.5。同样, 不论 K_c 值如何, Q 从 18 降到 10 时, 输出功率升高近 80% (表 2 和表 3), 而效率仅下降 5% 左右 (表 1)。

综上所述, Q 和 K_c 不仅影响效率和输出电流的恒定度, 而且对电源的输出功率、体积重量和造价都有影响。适当降低 Q 和 K_c 值, 能显著地升高输出功率, 缩小电抗器的体积重量, 降低造价, 而又不会使效率和恒流度明显降低。我们认为 Q 的合理取值范围是 20 左右, K_c 是 0.85 左右, 利用率高的电源取值高些, 利用率低的电源取值低些。

三、关于非磁性间隙问题

T 型 $L-C$ 变换器的恒流条件是 $\omega^2 LC=1$ 。显然这里的 L 和 C 都必须是与电压电流无关的线性元件。 C 一般都是用纸解电容器, 认为是线性的。而铁芯电抗器如果不采用非磁性间隙, 将是非线性的。众所周知, 当 $Q>10$ 时, 串联谐振电路的幅频特性是很尖锐的, 电路的固有频率稍稍偏离谐振频率时, 输出幅度便大大降低。而非线性电感显然要偏离谐振频率的, 这样就无所谓恒流了。采用非磁性间隙不是为

为了避免直流磁化的影响,而是为了保证 L 的线性。为了提高 Q 值,文献[3]不采用非磁性间隙,是错误的。

四、关于磁场强度问题

只考虑输出绕组的磁势 WI_2 是不全面的,还必须考虑最大负载下输入绕组的磁势 WI_1 。文献[3]中本来取的磁密 B_m 就很高,达到 1.7 Wb/m^2 ,考虑到 WI_1 的效应后,总磁势应为 $\sqrt{2} WI_2$,相应的 B_m 要比 1.7 Wb/m^2 明显增加,肯定进入饱和区,铁耗增大, Q 和 η 都要降低。

五、关于导线的直径选择问题

文献[3]选择两个相同的直径,也是不合理的。应该根据温升相同的原理来选择线径。 I_1 是随负载变化的,从发热等效的观点出发, I_1 可以表示为

$$I_1 = (0.5 \sim 0.7) I_2$$

六、设计举例

为了能与文献[3]中的例子比较,我们取同一个设计对象,即一台 CO_2 激光器的 L - C 恒流充电机,变换器的输入电压为工频 $U_1 = 220 \text{ V}$, 输出电流为 $I_2 = 3.5 \text{ A}$ 。

设计的任务是确定 L 和 C 的数值;确定电抗器的绕组的匝数 W 、线径 d_1 和 d_2 、铁芯规格和非磁性间隙 l_0 (精确值在调试时确定)。为了比较,也算出 Q 值和铜铁重量。

(1) 计算 L 和 C

为了使计算精确一些,使用关系式(3)来计算。令 $Q = 20$, $K_c = 0.85$, $R_H = 0$, 由(3)式得到绕组的电阻

$$R = \frac{Q(1+K_c)U_1}{[1+Q^2(1+K_c)^2]I_2} \quad (5)$$

数值代入(5)式后,得到 $R = 1.698 \Omega$ 。

$$L = \frac{QR}{\omega} \quad (6)$$

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} \quad (7)$$

数值代入(6)和(7)式后,得到 $L = 108.1 \text{ mH}$, $C = 93.8 \mu\text{F}$ 。

(2) 电抗器的计算

变换器的最大输出规定等于 U_1 , 相应的输出功率为 $U_2 I_2 = U_1 I_2 = 220 \times 3.5 = 770 \text{ W}$ 。所以选用 $\text{CD}25 \times 50 \times H$ 铁芯,对于 $\text{D}330-0.35$ 材料,磁路面积为 $S_c = 11.5 \text{ cm}^2$, 窗宽 $c = 4 \text{ cm}$, $a = 2.5 \text{ cm}$, $b = 5.0 \text{ cm}$, 重量 $G_c = 2.54 \text{ kg}$ 。

绕组的匝数为

$$W = 4520/S_c \quad (8)$$

S_c 的数值代入后,得到 $W = 393$ 匝,取 400 匝。

绕组的线径分别为

$$\left. \begin{aligned} d_2 &= 1.13 \sqrt{\frac{I_2}{j}} \\ d_1 &= 1.13 \sqrt{\frac{0.65 I_2}{j}} = 0.911 \sqrt{\frac{I_2}{j}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

取 $j = 2.5 \text{ A/mm}^2$, 得到 $d_2 = 1.337$, $d_1 = 1.078$ 。线径标准化后, $d_1 = 1.08/1.16$, $d_2 = 1.35/1.43$ (分母为带漆层后的直径)。

铁芯高度的估算:

$$H = \frac{1.8W(d_1^2 + d_2^2)}{C} \quad (10)$$

数值代入后,得到 $H = 61.03$ 。取 $H = 65$ 。端部留边 5 mm , 所以有效高度 $H' = 55$ 。

每层匝数(取整数)为:

$$n = H'/dK_A \quad (11)$$

K_A 为排绕系数,取 1.05; 将 d_1 和 d_2 的值代入后,得到 $n_1 = 45$ 匝/层, $n_2 = 37$ 匝/层。

绕组的层数为:

$$N = W/n \quad (12)$$

代入数值后得到 $N_1 = 9$ 层, $N_2 = 11$ 层。

绕组的厚度为

$$\delta = \delta_{\text{筒}} + NdK_B + \delta_{\text{绝}}N \quad (13)$$

$\delta_{\text{筒}}$ 为绝缘筒厚,取 2; K_B 为迭绕系数,取 1.15; $\delta_{\text{绝}}$ 为层间绝缘厚度,取 0.1; 代入 n_1 、 n_2 、 d_1 和 d_2 的数值后,得到 $\delta_1 = 14.9$, $\delta_2 = 21.2$ 。

两绕组的总厚度 $(\delta_1 + \delta_2) = 36.1 < C = 40$ 。可见 $(\delta_1 + \delta_2)$ 与 C 很接近,此设计是合理的。

非磁性间隙为

$$l_0 \approx 3 \times 10^{-3} WI_2 \quad (14)$$

代入数值后得 $l_0 \approx 4.2 \text{ mm}$ 。

此外,还可以算得: $R = 1.611 \Omega$, 相应的 $Q = 21.07$, $I_2 = 3.502 \text{ A}$ 。可见这些数值与原来的取值是十分接近的。这也说明 Q 值是不需要验算的。

在设计中电抗器的铁重 $G_c = 2.54 \text{ kg}$ (文献[3]中的为 5.6 kg), 铜重 $G_{\text{Cu}} = 1.88 \text{ kg}$ (文献[3]的计算概念有商榷的地方,无法比较)。

参 考 文 献

- [1] 孙乃庚:《激光》, 1982, 9, No. 9, 609.
- [2] 孙乃庚等:《激光》, 1978, 5, No. 2, 24.
- [3] 韩志敏:《中国激光》, 1984, 11, No. 6, 369.

(中国科学院上海光机所 孙乃庚

1984年7月17日收稿)