

开关电源开机输入限流电路方案的研究

The research of inrush current limiting methods in switching power supplies

四川大学 (610065) 易序馥 黄念慈

Sichuan University Yi Xufu Huang Nianci

[摘要] 本文详细分析了开关电源的开机冲击电流, 并总结了多种限流方案的各自特点及应用范围。

[Abstract] The paper analyzes several methods to limit power-on inrush current in detail, and discusses the virtue and defect of each methods.

叙词: 开机冲击电流 开关电源

Key words: power-on inrush current switching power supplies

1 引言

在开关电源中, 输入一般采用整流加大电容滤波电路。在合闸后的头半个周期里, 回路中可能会产生极大的冲击电流, (甚至可达数百安培), 不仅威胁二极管整流桥的运行安全, 而且会干扰其它用电设备的正常工作。因此必须对开机冲击电流加以抑制。

1.1 浪涌电流的理论分析

在合闸后的第一个半周期内(二极管导通期间), 电容电压初始值为 0, 忽略二极管压降, 因负载对冲击电流影响很小, 故可忽略负载。则电流的表达式即为下述微分方程的解(参见图 1-1)。

$$l \cdot \frac{di}{dt} + r \cdot i + \frac{1}{c} \int idt = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

因合闸瞬间冲击电流很大, 回路阻抗很小, 所以必须将电网供电变压器内部阻抗考虑在内。式中 l 、 r 、 i 、 C 、 U_1 、 ω 、 α 分别表示回路电感(包括变压器漏感和引线电感)、回路电阻(包括电源内阻和引线电阻)、充电电流、滤波电容、线电压、电网角频率、合闸瞬间电压相位。当 $\omega^2 cl$ 、 ωcr 、 ωl 均远小于 1 时, 该方程的解即为: $i(t) =$

$$\begin{aligned} & \sqrt{2}U_1 [-e^{-m} c \omega (\cos \alpha + \omega cr \sin \alpha) \cos(mt) \\ & + \omega c \cos(\omega t + \alpha) + \omega^2 c^2 r \sin(\omega t + \alpha)] \\ & + \frac{\sqrt{2}U_1}{2ml} e^{-m} (2 \sin \alpha - \omega cr \cos \alpha) \sin(mt) \end{aligned}$$

$$\alpha \leq \omega t < \pi \quad (2)$$

其中, $n = \frac{r}{2l}$ 衰减时间常数倒数 (3)

$$m = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4l - r^2 c}{l^2 c}} \quad \text{振荡时间常数} \quad (4)$$

由(2)式可知: 冲击电流的主要分量为

$$I_{sg} = \frac{\sqrt{2}U_1}{2ml} e^{-nt} (2 \sin \alpha - \omega cr \cos \alpha) \sin(mt) \quad (5)$$

由(5)可知当 $t=t_1 = \frac{1}{m} \arctg(\frac{m}{n})$ 时, I_{sg} 最大。

通常 ωcr 远小于 2, 所以由公式(5)表明, 在第一个半周范围内, 接近 90° 合闸时冲击电流最大, 0° 和 180° 时冲击电流最小。单相仿真结果见图 1-2。(具体参数: 电压 $U_1=220V$ 、 $r=0.7\Omega$ 、 $l=41\mu H$ 、 $C=470\mu F$ 。除特别注明外, 本文中所用参数均与此一致)。

为简单计, 若进一步忽略回路电感, 合闸后瞬间冲击电流峰值可近似为

$$I_{sg}(\max) = \frac{\sqrt{2}U_1 \sin \alpha}{r} \quad (6)$$

按此式计算的结果将比仿真及试验结果约大 20%。

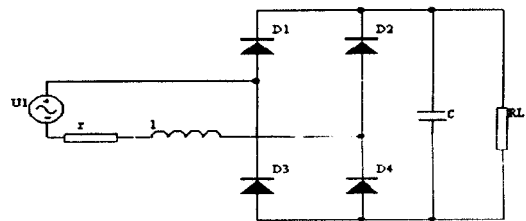


图 1-1 开关电源输入等效电路

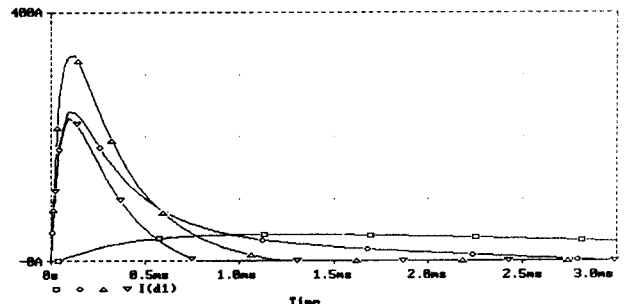


图 1-2 开机冲击电流仿真波形

图中 \square \diamond \triangle ∇ 分别对应于电压在 0° , 45° , 90° , 135°

° 时合闸情况。I(d1)表示流经二极管的冲击电流。

实验结果如图 1-3，图中上方曲线为对应 90° 合闸时电源电压波形，下方为冲击电流波形。冲击电流幅值为 320A，与仿真结果基本一致。

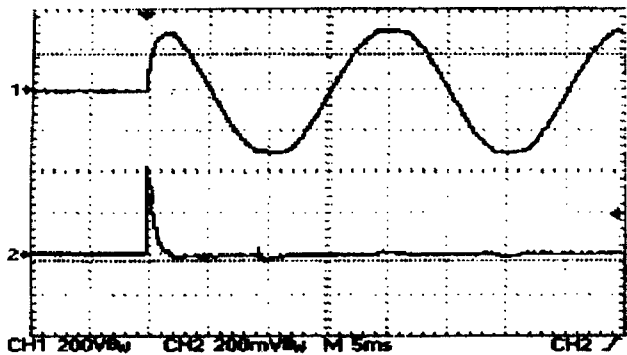


图 1-3 开机冲击电流实验波形

2. 限流措施

为了限制开机冲击电流,必须采取限流措施以保护整流二极管和降低干扰,

2.1 现有整流二极管的过载能力

根据众多国内生产厂家提供的资料表明:目前国内生产的整流二极管或二极管整流桥能够承受的浪涌电流 I_{TSM} 可达到其正向平均电流 I_F 的 15 倍以上。特别是额定值较小的二极管, I_{TSM} 可达到 I_F 的 50 倍以上。现简录一些典型二极管的参数如表 1。

表 1:

型号	正向平均 电流 $I_F(AV)$ (A)	浪涌 电流 I_{FSM} (A)	正向峰值 电压 V_{FM} (V)
1N4007	1.00	50	1.00
1N9399	1.50	50	1.00
1N5408	3.00	200	0.95
ZP5	5.00	90	1.60
ZP10	10.00	170	1.60
ZP30	30.00	560	1.80

目前比较流行的限流方案有以下几种:

2.2 电阻限流

合闸时,在输入回路串有限流电阻以遏制冲击电流,对滤波电容充电后,将此电阻短接,以避免较大的功率损耗。短接限流电阻的方法通常有两种:有触点式和无触点式。

有触点式一般采用继电器或接触器通过简单的电容充放电延时闭合来实现。如图 2-1, 2-2 所示。

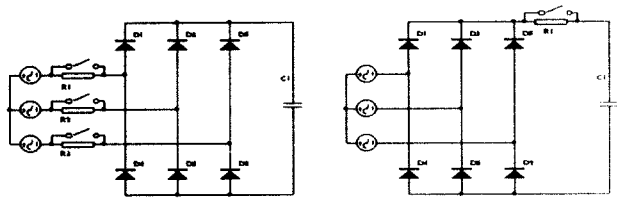


图 2-1

图 2-2

瑞典 ESAB 公司的 LHL315 以及美国 MILLER 公司的 XMT-300 系列电焊机即是采用图 2-1 的方式。美国飞马特公司的 300 系列电焊机采用图 2-2 的方式。

无触点式用晶闸管或者双向晶闸管来短接电阻。晶闸管的延时触发回路一般利用变压器的辅助绕组来实现。当辅助绕组上的电压达到触发电压值时,晶闸管导通,实现将限流电阻短接。见图 2-3, 2-4。

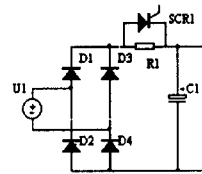


图 2-3

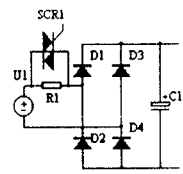


图 2-4

IBM/PC 微机用开关电源即是采用图 2-4 形式。

延迟短接电阻时间 τ 可按经验选取: 单相时 τ 取 $(7 \sim 11) R_1 C_1$, 三相时取 $(3 \sim 5) R_1 C_1$ 较合适 (R_1 限流电阻、 C_1 滤波电容)。如果短接瞬间电容电压小于整流输出电压, 电路中仍将有较大的瞬时冲击电流。单相仿真结果见图 2-5。在 100ms 短接处(对应于电源电压峰值)有一较大冲击电流。

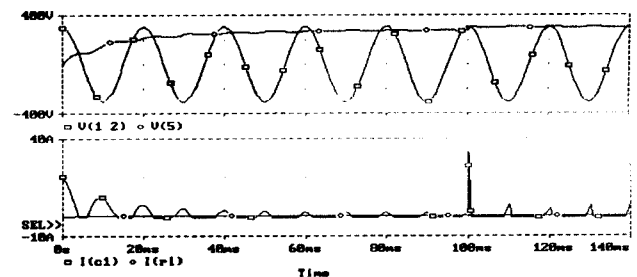


图 2-5

图中 $I(c1)$ 、 $I(r1)$ 、 $V(1,2)$ 、 $V(5)$ 分别表示滤波电容电流、电源电压、滤波电容电压。

此外,由表 1 可以看出,在小功率二极管方面,它的瞬时过载能力是相当强的。因此,在小功率开关电源电路中,也可以直接选择规格稍大的整流二极管,加一小限流电阻,即可省去控制回路,从而节约了成本。如夏普 NC-II T 机芯电源。

限流电阻可用以下方法选取:以图 2-3 为例,考

考虑到波形系数及安全裕量，二极管的通态平均电流一般取 2 倍的 I_o （负载电流）。考虑到二极管有较强的过载能力，假定所选二极管额定浪涌电流为 40A 考虑 50% 裕量，则接入的电阻为 $R_1 =$

$$\frac{311}{40 \times 50\%} = 15.5 \Omega$$

且选用的电阻 R_1 须能承受的瞬时电流为 $311 / 15.5 = 20A$ 。经验表明，线绕电阻一般可允许瞬时过流 20 倍左右。

利用电阻限流，具有电路简单，工作稳定，对运行环境要求不高，适用功率范围广的优点。缺点是增加了一些元件，使控制复杂化。在短接限流电阻瞬间，若电容电压小于整流桥输出电压，仍会有一定冲击电流存在，可能对附近电气设备造成干扰。

2.3 热敏电阻限流

具有负温度系数的热敏电阻 (NTC) 会因为环境温度升高或者由它通电后产生的自身热效应来改变它的阻值。利用热敏电阻限流即是基于以上原理。热敏电阻的特点也十分明显：电路简单，安装使用方便。噪音小；通过选择浪涌电流额定值较低的整流二极管可降低装置费用。

为了给下次启动提供稳定的限流保护，热敏电阻需要一段时间来恢复到周围环境温度才能再次启动，一般至少为 60 秒。如果一个热敏电阻不能够有效地限制浪涌电流，可以把两个或多个热敏电阻串联或者安装于电源电路的不同桥臂中。但是不可并联使用。同样，热敏电阻也可以安装在交流输入端或整流桥与滤波电容之间。如图 2-6，2-7 所示。

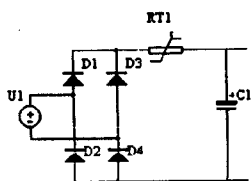


图 2-6

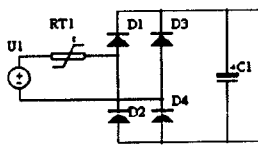


图 2-7

松下 KX-F90B 传真机开关电源即是采用图 2-7 形式。

热敏电阻的选择可参考以下步骤：首先根据开关电源的最大稳态电流（直流或交流）来选择热敏电阻。热敏电阻最主要的参数是最大稳态电流。示例如下：

如果开关电源的输出功率 $P_{out} = 750W$ ，效率 $\eta = 0.70$ ，则满载条件下，输入功率 $P_{in} = 1071.4W$ ，设输入电压最小值 $U_{min} = 200V$ ，

则 $I_{max} = P_{in} / U_{in} = 1071.4W / 200V = 0.5A$ ，因此，所选用的热敏电阻最大电流的额定值 I_{max} 至少是 0.5 安培。

第二步要选择热敏电阻的最小电阻值。为确保给整流桥提供足够的保护，输入电流一个周期的最大额定电流应不大于整流桥最大额定电流的 50%。如果整流桥所能承受的最大浪涌电流为 40A，则浪涌电流不应大于 $40 \times 50\% = 20A$ ，所选电阻值为 $220V / 20A = 11 \Omega$ 。

第三步，如有必要，可校验浪涌能量是否满足额定值（如当滤波电容很大，即充电电流时间常数 τ 很大时）。近似公式如下：

$$E = \int_0^{\infty} \frac{U_{1M}^2 e^{-2T/\tau}}{R} dt = \frac{U_{1M}^2}{R} \times \frac{\tau}{2} \quad (7)$$

式中 E 、 U_{1M} 、 R 、 τ 分别表示浪涌能量、电源电压、热敏电阻、充电时间常数。其中 $\tau = RC$ 。C 表示滤波电容。其它使用注意事项可查相关资料，这里不再赘述。

热敏电阻优点十分突出，很有发展前途，但是，因其对工作环境温度有一定要求，且受环境温度影响较大，故其应用范围受到一定限制，目前在中小功率的开关电源，特别是中高档家用电器中得到了较多应用。

3. 结论

从以上分析可以看出，对于功率较小且工作环境良好（工作温度不高，环境温度较稳定）的开关电源，可优先考虑采用热敏电阻限流；对于功率较大，工作环境较差，稳定性要求较高的场合，可考虑采用有触点式的电阻衰减限流方式。相比较而言，双向晶闸管式和晶闸管式适用功率范围较宽，但是，因其增加的控制回路使电路复杂。以上几种限流方法各有优缺点，设计时，应综合加以考虑、平衡。

参考文献：

1. 王英剑等. 新型开关电源实用技术. 电子工业出版社. 2000
2. '99 中国电力电子产品及企业手册, 世界图书出版社. 2000
3. Circuit Protection Devices NTC Thermistors. RTI Electronics, Inc

作者简介

易序馥：男，1974 年 10 月生，硕士生。研究方向为电力电子技术。