

# 正弦激励下的 RL 一阶电路暂态过程实验研究

梁宁欣

(南京农业大学 工学院, 江苏 南京 210031)

摘要: 研究 RC、RL 一阶电路的暂态过程响应及测定时间常数  $\tau$  是电路实验课程中的重要内容, 而现今大部分高校在一阶电路实验中采用直流激励和 RC 实验, 导致学生误认为无论何种激励 RL 一阶电路一定会经历暂态过程。本文重点研究实验改革后正弦激励下的 RL 一阶电路的暂态过程, 分析了该电路在接通正弦交流电时, 直接进入稳态响应的条件以及该电路产生过电压、过电流现象的原因。

关键词: 电路实验改革; RL 电路; 暂态过程; 过电流; 过电压

对于直流激励下的 RL、RC 一阶电路, 在换路瞬间, 由于储能元件中的能量不能突变, 因此, 电路中的响应一般都会出现暂态过程, 并且在这种暂态过程中储能元件的两端不会出现过电压现象, 储能元件所在的支路中也不会出现过电流现象。然而, 对于正弦激励下的一阶电路, 其换路瞬间是否一定会经历暂态过程? 如果存在暂态过程, 是否有过电压、过电流现象? 具有怎样的特点和规律? 本文以正弦激励下的 RL 一阶电路为例, 借助 Multisim 仿真进行了重点讨论。

## 1 正弦激励 RL 一阶电路的完全响应

正弦激励下的 RL 一阶电路图如图 1 所示。

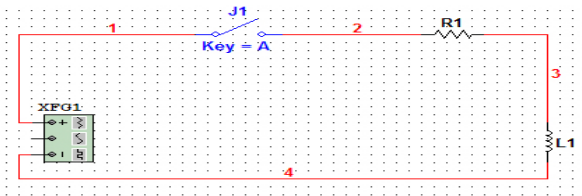


图 1 正弦激励下的 RL 一阶电路

设在  $t=0$  时, 闭合开关  $J_1$ , 在电压源  $U(t) = U_m \sin(\omega t + \theta)$  的正弦波激励下, 电路的微分方程为  $L \frac{di_L(t)}{dt} + R i_L(t) = U_m \sin(\omega t + \theta)$  ( $t \geq 0$ ), 该方程的全解为  $i_L(t) = A e^{-\frac{R}{L}t} + I_{Lm} \sin(\omega t + \theta_L)$ , 其中  $I_{Lm} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$ ,  $\theta_L = \theta - \arctg(\frac{\omega L}{R})$ 。A 根据电路的初始条件确定。设  $t=0$  时刻, 电路中的初始电流为  $I_0$ , 则可得正弦激励下, 该 RL 一阶电路的完全响应为  $i_L(t) = (I_0 - I_{Lm} \sin \theta_L) e^{-\frac{R}{L}t} + I_{Lm} \sin(\omega t + \theta_L)$ 。由上式可以看出, 流过电感的电流  $i_L(t)$  从  $i_L(0^+) = I_0$  开始, 经过一段过渡过程最终达到稳定, 其稳态响应为。

## 2 RL 一阶电路进入稳态的条件分析

换路后的一阶 RL 电路, 不经历暂态过程而直接进入稳态响应的充要条件是  $I_0 - I_{Lm} \sin \theta_L = 0$ 。若在非零状态下换路, 则电路直接进入稳态响应的必要条件是  $I_0 \leq I_{Lm} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$ , 亦即在换路时电感上流过的电流  $I_0$  应小于或等于激励电压幅值  $U_m$  的  $\frac{1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$  倍, 在非零状态下换路其充分条件是  $\sin \theta_L = \frac{I_0}{I_{Lm}} = \frac{I_0 \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}{U_m}$ , 因此  $\theta = \theta_L + \arctg \frac{\omega L}{R} = \arcsin \frac{I_0 \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}{U_m} + \arctg \frac{\omega L}{R}$ 。若在零状态下换路, 则电路直接进入稳态响应的充要条件是正弦激励的初相位  $\theta_L = 0$  或  $\theta_L = \pi$ , 因此  $\theta = \arctg \frac{\omega L}{R}$  或  $\theta = \arctg \frac{\omega L}{R} + \pi$ 。

由上述分析的结果可知: RL 一阶电路换路后是否经历暂态过程, 完全取决于电路的初始条件、电路元件的参数以及外加激励信号在换路时的状态等因素决定, 在  $I_0$ 、 $R$ 、 $L$ 、 $U_m$  一定的情况下, 换路后的状态完全由初相位  $\theta$  决定。

## 3 过电压与过电流现象的产生

不满足  $I_0 - I_{Lm} \sin \theta_L = 0$  条件的 RL 一阶电路, 在换路后都将不可避免地出现暂态过程, 而且可能在换路过程中电路产生过电流和过电压现象。

### 3.1 过电流现象

在非零状态下, 根据原理电路图图 1, 在  $t=0$  时刻闭合开关  $J_1$ , 若此时恰好使得  $\theta_L = -\frac{\pi}{2}$ , 即恰好使  $\theta = -\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{\omega L}{R}$  ( $t \geq 0$ ), 若电路时间常数  $\tau$  远远大于正弦激励的周期, 即  $\frac{L}{R} \gg T$ ,  $e^{-\frac{Rt}{L}} \approx 1$  时则

$i_L(\frac{T}{2}) \approx i_L(0^+) + 2I_{Lm}$ , 则此情况下的电流比稳态电流幅值  $I_{Lm}$  的二倍还大, 即产生了过电流现象。采用 Multisim 软件进行仿真, 图 1 各参数采用  $U_1 = 150 \sin(500\pi t - \frac{\pi}{2})$ ,  $R = 50\Omega$ ,  $L = 2H$ , 理论计算得到  $I_{Lm} = 47.7mA$ , Multisim 中 Oscilloscope 的仿真结果波形如图 2 所示。

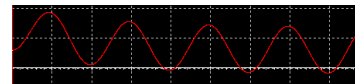


图 2 Oscilloscope 仿真波形图

在  $t = \frac{T}{2}$  处附近, 电感上的最大瞬时值电流为  $105.6mA$ , 接近为其稳态时电流幅值的 2.2 倍, 说明产生了过电流现象, 与公式推导分析结果吻合。从物理本质上讲, 产生过电流的原因是在一定的时间内, 外加激励对电感充电的结果。

### 3.2 过电压现象

正弦激励下的 RL 一阶电路在换路的瞬间, 在产生过电流的同时可能将伴随着产生过电压现象。  $u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = R i_L + I_{Lm} \sin \theta_L e^{-\frac{R}{L}t} + \omega L I_{Lm} \sin(\omega t + \theta_L + \frac{\pi}{2})$  ( $t \geq 0$ ),  $t=0$  时刻将开关合上, 且使得初相位  $\theta = -\frac{\pi}{2}$ , 则当  $I_0 = I_{Lm}$  时在  $t \rightarrow \infty$ ,  $u_{Lm} = \omega L I_{Lm}$ , 故有  $\frac{|u_L(0)|}{u_{Lm}} = \frac{2R}{\omega L} = \frac{2R}{X_L}$ , 当  $R \gg X_L$  时, 有  $\frac{|u_L(0)|}{u_{Lm}} \gg 1$ 。

### 3.3 实验验证

通过仿真分析已初步得到正弦激励下 RL 一阶电路在换路瞬间产生过电压、过电流的条件, 下面进行实际实验验证分析, 在实验室电路中按图 3 连接好电路, 仍采用  $U_1 = 150 \sin(500\pi t - \frac{\pi}{2})$ ,  $R = 50\Omega$ ,  $L = 2H$  参数。通过观测实验室的双踪示波器 YB4328(带宽 25MHz) 绘制波形如图 4 所示。稳态时电流幅值为  $46.4mA$ , 在  $t = \frac{T}{2}$  处附近, 电感上的最大瞬时值电流约为  $16.1mA$ , 接近为其稳态时电流幅值的 2.502 倍, 说明产生了过电流现象, 与理论分析结果吻合。

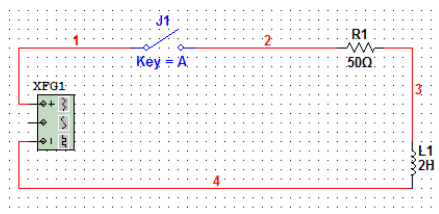


图 3 实验验证电路原理图

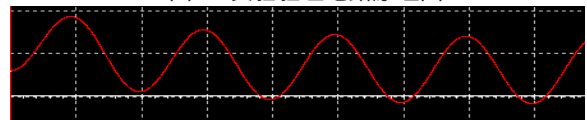


图 4 YB4328 示波器观测波形图

## 4 结论

综上所述, RL 一阶电路在接通正弦激励后, 能否直接进入稳态响应, 是否产生过电流现象, 均与正弦激励的初相  $\theta$  有关, 而  $\theta$  又是由  $t=0$  时刻正弦激励的状态决定, 在不同的时刻合上开关, 正弦激励接入电路时的状态不同, 当  $\theta$  满足一定条件时, 有可能使电路产生过电流和过电压现象。

### 参考文献

[1] 黄湘宁. 正弦激励下的 RL 电路的暂态过程 [J]. 青海师专学报. 2000.

作者简介: 梁宁欣(1995, 10-), 女, 福建龙岩, 本科在读, 研究方向: 自动控制。