

电流互感器在开关电源中的应用

陶洪山，吴燮华

(浙江大学电气工程学院，浙江 杭州 310027)

摘要：电流互感器可以用来检测高频开关电源中的单极性电流脉冲。分析了电流互感器构成的电流检测电路工作过程。比较了磁芯自复位、强迫复位的特点。给出了试验结果。

关键词：电流互感器；磁芯复位；开关电源

1 引言

在高频开关电源中，需要检测出开关管、电感等元器件的电流提供给控制、保护电路使用。电流检测方法有电流互感器、霍尔元件和直接电阻取样。采用霍尔元件取样，控制和主功率电路有隔离，可以检出直流信号，信号还原性好，但有 μ s级的延迟，并且价格比较贵；采用电阻取样价格非常便宜，信号还原性好，但是控制电路和主功率电路不隔离，功耗比较大。

电流互感器具有能耗小、频带宽、信号还原性好、价格便宜、控制和主功率电路隔离等诸多优点。在 Push Pull、Bridge等双端变换器中，功率变压器原边流过正负对称的双极性电流脉冲，没有直流分量，电流互感器可以得到很好的应用。但在 Buck、Boost等单端应用场合，开关器件中流过单极性电流脉冲；原边包含的直流分量不能在副边检出信号中反映出来，还有可能造成电流互感器磁芯单向饱和；为此需要对电流互感器构成的检测电路进行一些改进。

2 电流互感器检测单极性电流脉冲的应用电路分析

根据电流互感器磁芯复位方法的不同，可有两种电路形式：自复位与强迫复位。自复位在电流互感器原边电流脉冲消失后，利用激磁电流通过电流互感器副边的开路阻抗产生的负向电压实现复位，复位电压大小与激磁电流和电流互感器开路阻抗有关。强迫复位电路在原边直流脉冲消失期间，外加一个大的复位电压，实现磁芯短时间内快速复位。

2.1 电流互感器检测电路

常用的电流互感器检测电路如图1(a)所示。

图1(b)表示原边有电流脉冲时的等效电路，电流互感

器简化为理想变压器与励磁电感 L_m 模型， R_s 为取样电阻。

当占空比 $D < 0.5$ 时，在电流互感器原边电流脉冲消失后，磁芯依靠励磁电流流过采样电阻 R_s 产生负的伏秒值，实现自复位（如图 1 (d1) ~ (i1) 所示），由于采样电阻 R_s 很小，所以负向复位电压较小；当电流脉冲占空比很大时 ($D > 0.5$)，复位时间很短，没有足够的复位伏秒值，使得磁芯中直流分量 I_d 增大，有可能造成磁芯逐渐正向偏磁饱和（如图 1 (d2) ~ (i2) 所示），失去检测的作用，所以自复位只能应用于电流脉冲占空比 $D < 0.5$ 的场合。

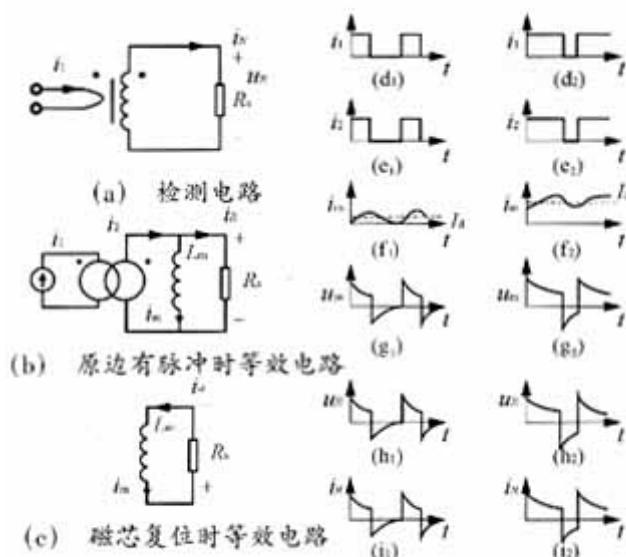


图 1 常用的电流互感器检测电路分析

可以看出，此电路对于检测单极性直流脉冲存在诸多缺点。励磁电感电流 i_m 中存在直流分量 I_d ，容易导致磁芯饱和。输出电压信号 u_R 为双极性，不便于后级电路处理。

2.2 改进的自复位电流互感器

为了实现输出电压 u_R 的单极性输出，在电流互感器端加上一个二极管，根据原边输入电流 i_1 与输出电压 u_R 的相位的不同、信号地位置的不同，可有 4 种电路结构，如图 2 所示。

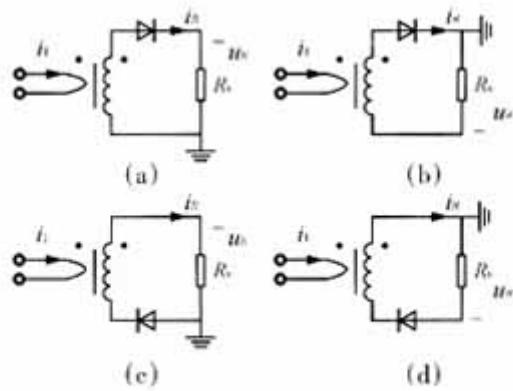


图 2 改进的电流互感器检测电路

对图 2(c)的电路工作过程进行分析，电路在一个脉冲周期内的工作波形如图 3 所示。

图 3(c)表示电流互感器磁芯复位时的等效电路，CT 为电流互感器副边分布电容，CD 为二极管结电容。图 3(d)~(i)绘出了占空比小时，磁芯充分复位的各参数波形。

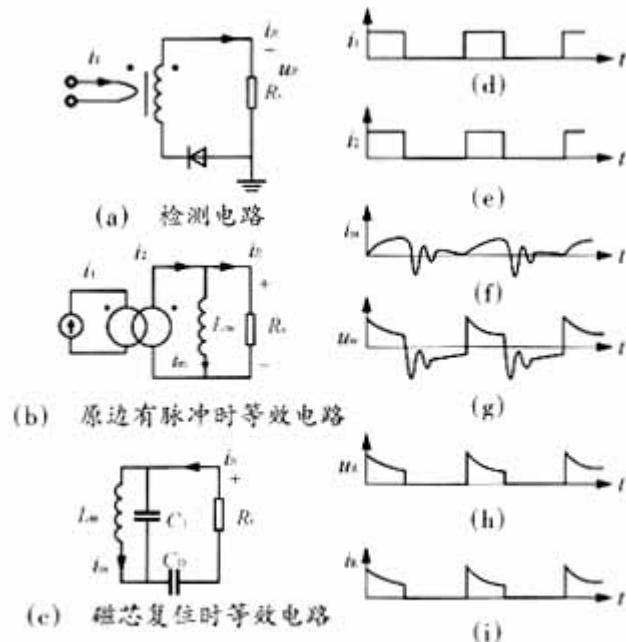


图 3 改进的电流互感器检测电路分析

在电流互感器原边电流脉冲消失后，磁芯的复位依靠励磁电流在 L_m 、CT、CD 中谐振产生负的复位电压值，实现自复位，如图 3(g)所示。 L_m 、CT 构成的谐振电路特征阻抗远大于 R_s ，所以复位效果好于图 1 电路。但是，谐振产生的复位电压并不是很大，当脉冲占空比很大时，复位时间很短，仍有可能造成磁芯逐渐正向偏磁饱和，所以

也只能应用于电流脉冲占空比 $D < 0.5$ 的场合。

由于互感器副边线圈匝数很多，分布电容大，谐振电流主要从电流互感器流过；流经 R_s 、CD 支路的电流很小，并且 R_s 很小，所以复位电流经 CD 支路的谐振电流在 R_s 上产生的负向电压可以忽略，取样输出电压 u_R 波形如图 3(h) 所示。因为二极管的作用，输出电压信号 u_R 为单极性，其幅值与原边电流信号脉动量成正比，便于后级电路处理。

2.3 强迫复位

在单端应用中，特别是 Boost 电路中，需要精确地再现高占空比的单极性脉冲。自复位不能实现检测高占空比电流脉冲，必须对磁芯进行强迫复位。强迫复位的电路很多，这里分析一种最简单易行的强迫复位电路。如图 4 所示，分别对应于图 2 中的 4 种电路。

对图 4(c) 的电路工作过程进行分析。图 5(b) 表示原边有电流脉冲时的等效电路，由于二极管的隔离作用，复位电压 $+V_r$ 对电流的检测没有影响。图 5(c) 表示磁芯复位时的等效电路。电路在一个脉冲周期内的工作波形如图 5(d)~(i) 所示， $0 \sim t_1$ 时间内原边有直流脉冲， $t_1 \sim t_2$ 时间为磁芯复位过程， $t_2 \sim T$ 为复位完毕后波形。

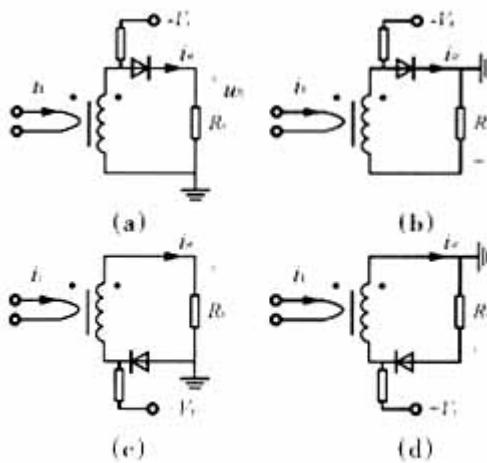


图 4 强迫复位的电流互感器检测电路

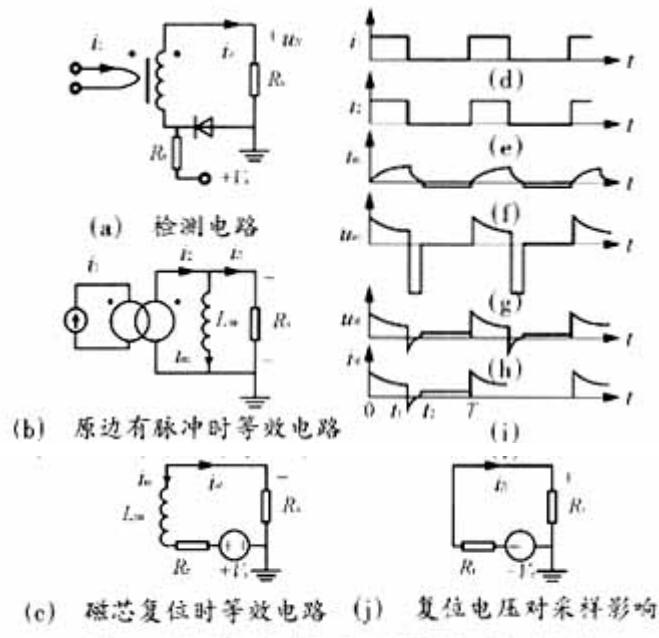


图 5 强迫复位的电流互感器检测电路分析

在电流互感器原边电流脉冲消失后，磁芯开始复位，二极管反向阻断，复位电压 V_r 加在励磁电感上，强迫磁芯快速复位。图 5(g)绘出了激磁电感上的电压，由于复位电压远大于磁芯的正向电压，所以磁芯能够在很短的时间内充分复位，可以应用于检测电流脉冲占空比 $D > 0.9$ 的场合。

图 5(j)表示复位电压 V_r 给检测信号带来的误差。磁芯复位完毕后，电流互感器副边相当于一根导线， V_r 在取样电阻上有一个分压，从而引起误差，大小为

$$V_{R_r \text{ error}} = \frac{R_r}{R_s + R_r} \cdot V_r \quad (1)$$

由于 R_r 远大于 R_s ，所以 $V_{R_r \text{ error}}$ 很小，可以忽略其影响。在 $t_2 \sim T$ 时间内，磁芯中还会有一个很小的直流分量为

$$i_m = -\frac{V_r}{R_s + R_r} \quad (2)$$

由于 R_r 很大，其影响也可以忽略。

2.4 多个电流互感器的组合使用

多个电流互感器可以组合起来，用于检测含有低频分量的单极性高频直流脉动。例如，常用的由 Boost 电路构成的单相 PFC 电路，工作于 CCM 状态，需要检出电感电流提供控制电路使用。电感电流中既含用工频正弦电流，又有高频脉动电流，为此，可以用电流互感器分别检出开关管、二极管中的单极性电流脉冲，再叠加起来，即为电感电流。检测电路如图 6 所示，占空比有可能超过 0.5，所以磁芯需要强迫复位。

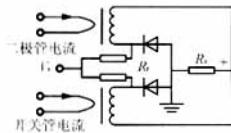


图 6 电流互感器组合使用合成电感电流

3 电 流 互 感 器 的 设 计 方 法

根据原边电流 i_1 大小、副边输出电压 U_m 的要求确定电流互感器变比 n ；磁芯可选用初始磁导率大的铁氧体材料，大小根据磁路有效面积确定。可按式（3）选择

$$A_e = \frac{U_m D}{N \cdot B \cdot f_s} \quad (3)$$

式中： A_e 为磁路有效截面积；

U_m 为电流互感器副边输出最大电压；

N 为副边线圈匝数；

B 为磁芯最大工作磁通，一般取为饱和磁通的 $1/2 \sim 1/3$ ；

f_s 为原边脉冲电流频率。

R_s 根据副边最大电压 U_m 、电流 I_R 求出， R_r 取值要远大于 R_s ，可以是 R_s 的 $50 \sim 100$ 倍，具体大小可根据实验结果调整。

4 实 验 结 果

1) 在 Boost 电路中采用自复位电流互感器检测开关管电流，提供给控制电路电流反馈环。磁芯选用锰锌铁氧体，磁路有效截面积 0.25 mm^2 ，变比 100，采样电阻 3.9Ω 。开关频率 20 kHz ，电流互感器原边电流峰值 3.6 A ，最大占空比 0.45。实验波形如图 7 所示。

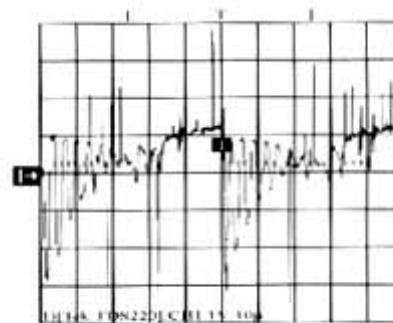
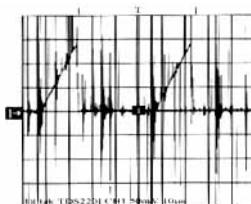
(a) 副边电压 u_{ss} 波形(b) 采样电阻电压 u_R 波形

图 7 实验波形

2) 在双极性 SPWM 逆变电路中, 直流母线流过正负不对称的双极性电流脉冲, 采用强迫复位电流互感器检测出来, 提供给的过流、直通保护电路。磁芯选用锰锌铁氧体, 磁芯截面积 0.35 mm^2 , 变比 100, 采样电阻 16Ω 。开关频率 20 kHz , 逆变输出正弦波频率 50 Hz , 电流互感器原边电流峰值为 3 A , 最大占空比 0.95 。一个开关周期内及一个工频周期内的实验波形分别如图 8 及图 9 所示。

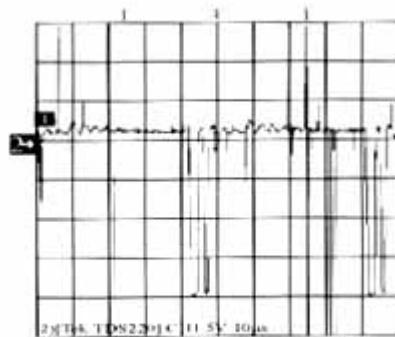
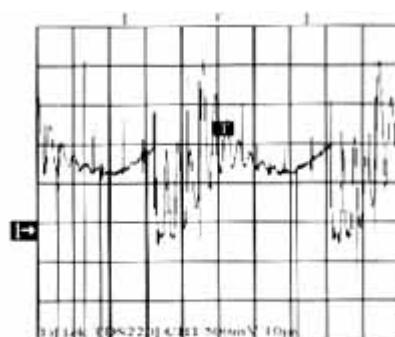
(a) 副边电压 u_n 波形(b) 采样电阻电压 u_s 波形

图 8 一个开关周期内波形

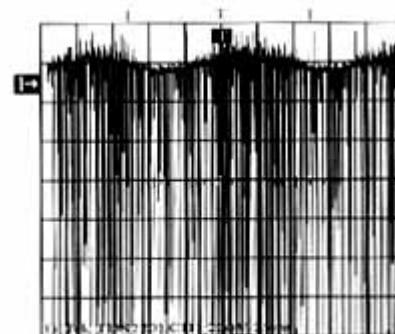
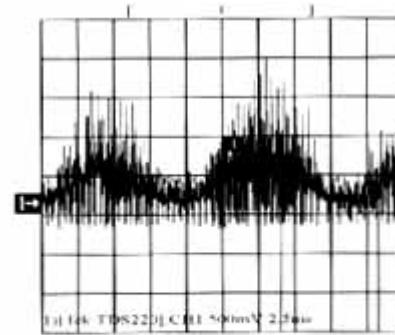
(a) 副边电压 u_n 波形(b) 采样电阻电压 u_s 波形

图 9 一个工频周期内波形

5 结语

本文分析了自复位、强迫复位电流互感器检测单极性直流脉冲时的工作过程，绘出了电路在一个脉冲周期内的波形，比较了各种电路磁芯复位的特点，简单的介绍了电流互感器的设计方法。试验结果验证了分析的正确性。

参 考 文 献

- [1] Philip C. Todd. Extend Current Transformer Range[Z]. Unitrode Design Note DN— 41, 1997.
- [2] 张占松,蔡宣三.开关电源的原理与设计 [M].北京 :电子工业出版社 ,1999.