

改进的绝缘子闪络快速监测系统

刘志学

(江苏省电力公司检修分公司苏州检修分部, 江苏 苏州 215000)

摘 要: 阐述了实现绝缘子闪络快速监测的必要性。分析了早前文献设计的绝缘子闪络快速监测系统的动作过程及存在的问题。提出了两种改进的监测系统, 这两种系统分别通过绝缘子电流的有效值和瞬时值进行闪络判断, 当所选增益调整电路的调整倍数和 Rogowski 线圈的互感满足一定关系时, 这两种监测系统均能成功避免绝缘子泄漏电流带来的负面影响, 同时, 这两种系统在原系统的基础上还增加了防信号过冲功能以及自动复归功能。文章最后指出, 当选择合适的电流定值时, 本文提出的两种监测系统亦可实现绝缘子闪络预警功能, 为绝缘子状态诊断提供参考。

关键词: 闪络监测; 闪络预警; 状态诊断; 改进; 基本 RS 触发器; Rogowski 线圈; 光耦

0 引言

高压绝缘子发生闪络故障时, 微机保护交流采样算法数据窗会使得故障切除时间在断路器开断时间的基础上增加延时, 影响系统的暂态稳定, 在闪

络故障的事故处理中, 由于闪络点不明显等因素的影响, 会使得故障位置的查找存在困难, 若能实现绝缘子闪络故障的快速监测, 并与相关二次设备配合使用, 则上述两个问题可成功解决^[1]。

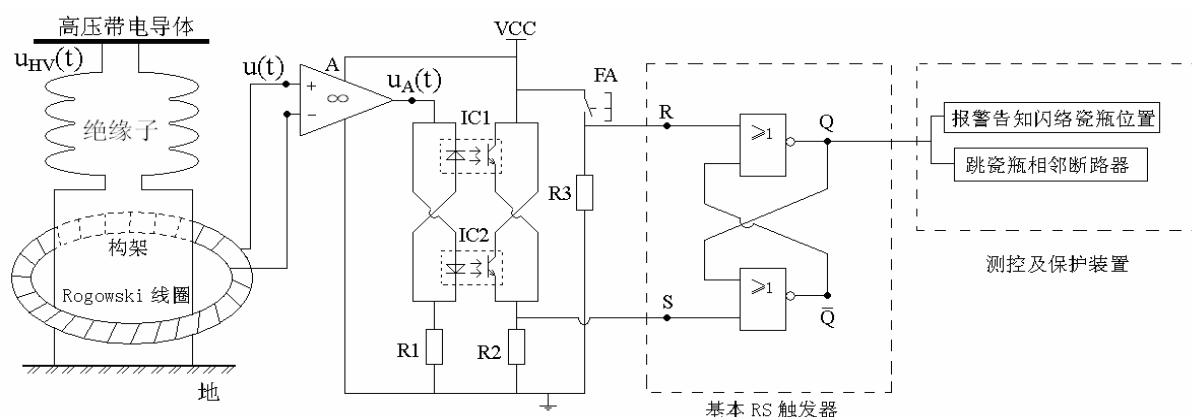


图 1 早前文献提出的绝缘子闪络快速监测系统

早前文献^[1]提出的绝缘子闪络快速监测系统由于未充分考虑泄漏电流带来的负面影响, 使得该系统在绝缘子正常运行时有可能由于泄漏电流产生误动作。本文提出了两种改进方案, 这两种方案均能消除泄漏电流带来的影响, 且当选择合适参数时, 这两种方案亦可实现绝缘子闪络预警功能。

1 早前绝缘子闪络快速监测系统存在的问题

1.1 主要元件情况

文献^[1]设计了一种绝缘子闪络快速监测系统, 该系统如图 1 所示。

图 1 中 Rogowski 线圈输出电压为^[2]:

$$u(t) = M \frac{di_1(t)}{dt} \quad (1)$$

上式中 i_1 为 Rogowski 线圈所包络的电流。

表 1 两个或非门组成的基本 RS 触发器的功能表

R	S	Q
0	1	1
1	0	0
0	0	不变
1	1	不定

两个或非门组成的基本 RS 触发器功能表^[3]见表 1。

1.2 工作原理

该文指出：

a) 当绝缘子无闪络故障时，Rogowski 线圈包络电流为零，无限大增益运放输出电压为 0，两个光耦里的发光二极管均不发光，光敏三极管截止，触发器 S 端始终为 0，触发器不动作。

b) 绝缘子闪络瞬间，无限大增益运放输入电压差 $u(t)$ 不为 0，其输出电压的绝对值瞬时突变为偏置电压 VCC，光耦 IC1 或 IC2 内发光二极管发光，对应光敏三极管导通，触发器 S 端突变为 1，触发器动作，Q 端瞬时置 1 并保持。

c) 发生故障后 Q 可与保护装置配合，先于主保护作用于绝缘子相邻断路器跳闸，快速切除故障，避免由采样数据窗带来的延时。同时，Q 还可与测控装置配合作用于后台报警，向运行人员告知闪络绝缘子位置，为事故处理提供参考。故障处理完后需手按 FA 按钮（先合后分），恢复 RS 触发器初始状态。

该文同时指出：

监测系统的响应时间仅由其内部晶体管传输时间决定，一般可达纳秒级，总的时间对于电力系统来说可忽略不计，即可认为监测系统的响应时间为瞬时。

1.3 存在的问题

虽然从定性层面上来看，由于实际的运算放大器增益仅能做到一个相对较大的有限值，若这时选择合适的 Rogowski 线圈互感，则可认为绝缘子正常时泄漏电流响应的电压 u_A 约等于 0，这个小电压始终不会使光耦内二极管动作。但是该文提出的监测系统未能从数学层面上充分考虑到正常运行时绝缘子泄漏电流带来的负面影响，从理论上分析，若考虑泄漏电流，则图 1 系统在绝缘子正常运行时

可能会误动作。

2 两种改进的绝缘子闪络快速监测系统

本文提出了两种改进的绝缘子闪络快速监测系统，这两种监测系统均能成功避免绝缘子泄漏电流带来的负面影响，同时，这两种系统还增加了防信号过冲功能以及自动复归功能。

2.1 第一种改进的绝缘子闪络快速监测系统

2.1.1 基本情况

图 2 为第一种改进的绝缘子闪络快速监测系统的原理示意图，它和图 1 系统相比有如下不同：

- a) 增加了双向击穿二极管 V；
- b) 将无限大增益运放换成了增益调整电路；
- c) 增加了自动/手动复归选择开关 S1；
- d) 增加了时间继电器 J 及其辅助触点。

双向击穿二极管 V 的作用是防止信号过冲，即避免 Rogowski 线圈输出电压过大而损坏电子元件。增益调整电路的作用是将 Rogowski 线圈输出的电压 u 成比例（比例系数为 A）的转换为光耦电路的输入电压 u_{out} （即实现 $u_{out} = Au$ ），该电路可通过多种方式实现，本文给出了两种简单的实现方式，如图 3 所示。

自动/手动复归选择开关 S1、时间继电器 J 及其辅助触点共同实现了对监测系统复归方式的控制，当 S1 放在 2 位置时（手动复归方式），时间继电器 J 退出使用，监测系统动作使闪络故障切除后需人工手动复归（使 FA 触点先合后分），复归后 Q 输出为 0；当 S1 放在 1 位置时（自动复归方式），时间继电器 J 投入使用，监测系统动作后（Q 置 1 后）经过延时 J 会自动复归，即时间继电器辅助触点 J 会自动先合，使 Q 置 0，然后时间继电器 J 失电，触点 J 断开，Q 保持为 0。

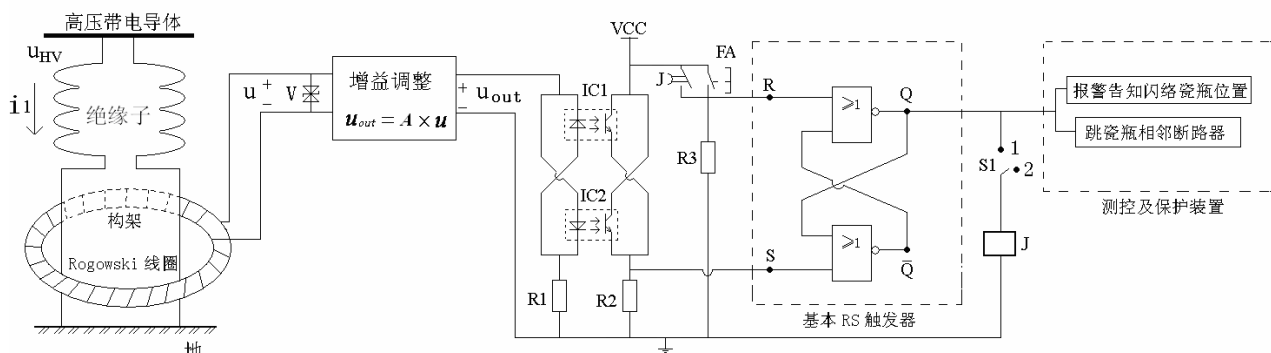


图 2 第一种改进的绝缘子闪络快速监测系统

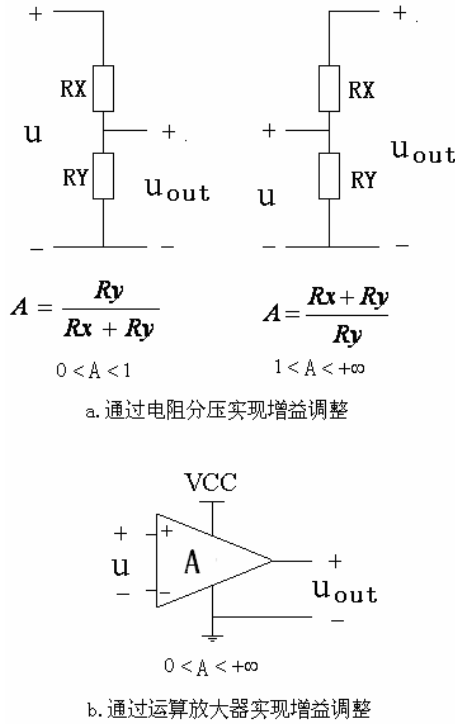


图3 增益调整电路的两种实现形式

延时 J 的整定原则如下：时间继电器 J 的动时刻应晚于闪络故障消失时刻并留有一定裕度，即 J 应大于断路器开断时间并留有一定裕度。

2.1.2 工作原理

绝缘子泄漏电流的有效值一般为毫安级别，而闪络电流一般可达上千安培，也就是说泄漏电流和闪络电流在大小上就可明确区分。若泄漏电流和闪络电流的分界值 I_{set} （有效值）、光耦内发光二极管

开启电压 U_{TH} 均已确定，且同时近似认为泄漏电流和闪络电流均为正弦波，则通过选择合适的 Rogowski 线圈互感和增益调整电路的调整系数，即可实现图 2 系统对绝缘子闪络故障的快速监测。

可以看出，当 Rogowski 线圈互感 M 和增益调整系数 A 满足下面的关系时，图 2 系统就能实现绝缘子闪络的快速监测功能：

$$A \left| M \frac{di_{set}}{dt} \right|_{\max} = \sqrt{2} A w M I_{set} = U_{TH} \quad (2)$$

$$\Rightarrow AM = \frac{U_{TH}}{\sqrt{2} w I_{set}} \quad (3)$$

当绝缘子没有发生闪络故障时，绝缘子流过的电流为毫安级别的泄漏电流，此时 $I_1 < I_{set}$ ，即：

$$A \left| M \frac{di_1}{dt} \right|_{\max} = \sqrt{2} A w M I_1 < U_{TH} \quad (4)$$

也就是说此时光耦 IC1 及 IC2 内发光二极管均不发光，光敏三极管截止，触发器不动作，Q 输出始终为 0。

若 $t=0$ 时刻绝缘子发生闪络故障，且设：

- a) $t=0$ 时刻绝缘子流过的泄流电流瞬时值为 B
- b) 绝缘子上电压为：

$$u_{HV}(t) = \sqrt{2} U_{HV} \cos(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

- c) 闪络时绝缘子等效电阻为 R

且同时不考虑双向击穿二极管 V 对 u 的限制以及运放实现增益调整时运放偏置电压对 u_{out} 的限制，则：

$$|u_{out}|(0^+) = \left| AM \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{\sqrt{2} U_{HV} \cos(\omega t + \varphi) / R - B}{t} \right| \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} &= +\infty & \varphi \neq \pm \arccos\left(\frac{BR}{\sqrt{2} U_{HV}}\right) \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{aligned} &= \frac{\sqrt{2} A w M U_{HV}}{R} \sqrt{1 - \frac{B^2 R^2}{2 U_{HV}^2}} & \varphi = \pm \arccos\left(\frac{BR}{\sqrt{2} U_{HV}}\right) \end{aligned} \right. \quad (8)$$

可以看出 (8) 中的 $\sqrt{1 - \frac{B^2 R^2}{2 U_{HV}^2}}$ 约等于 1，

$\frac{U_{HV}}{R}$ 为闪络电流有效值的表达式，其一般可达上

千安培。由于闪络电流和泄漏电流的分界值 I_{set} 可选择的很小（如可选择 10A 以下），所以通过分析 (2)、(7)、(8) 式可知发生闪络故障时：

$$|u_{out}| \approx U_{TH} \frac{U_{HV}}{R} \gg U_{TH} \quad (9)$$

即闪络时 IC1 或 IC2 内发光二极管亮，相应光敏三极管导通，S 瞬时置 1，Q 输出为 1 并且保持。

不难看出，若考虑双向击穿二极管 V 对 u 的限制

以及运放实现增益调整时运放偏置电压对 u_{out} 的限制，则 u_{out} 的最大值会缩小，但对其最小值没有影响，也就是说在发生闪络故障瞬间 u_{out} 还是大于 U_{TH} ，监测系统的动作不变。

发生故障后 Q 可与保护装置配合，先于主保护作用于绝缘子相邻断路器跳闸，快速切除故障，避免由采样数据窗带来的延时。同时，Q 还可与测控装置配合作用于后台报警，向运行人员告知闪络绝缘子位置，为事故处理提供参考。

若自动/手动复归选择开关 S1 开关放在 2 位置，则在故障处理完毕后需手钎 FA 按钮，恢复基本 RS 触发器至初始状态，以便下一次闪络时监测系统正常使用。若 S1 开关放在 1 位置，则监测系统经过

一定延时后会自动复归。

不难看出，若 Rogowski 线圈互感 M 可调，则图 2 系统中的增益调整电路可去除。此时 M 的整定值为：

$$M = \frac{U_{TH}}{\sqrt{2}wI_{set}} \quad (10)$$

2.2 第二种改进的绝缘子闪络快速监测系统

2.2.1 基本情况

图 4 为第二种改进的监测系统，它和第一种改进的监测系统相比，在增益调整电路的前面增加了积分电路。

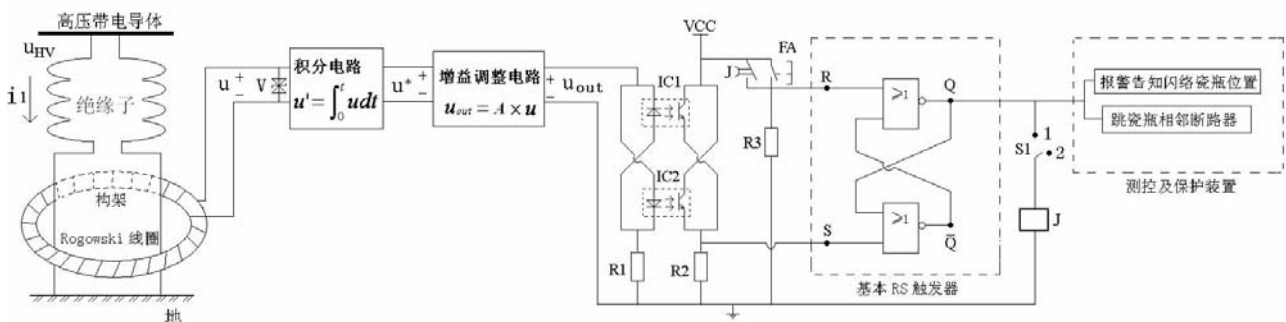


图 4 第二种改进的绝缘子闪络快速监测系统

积分电路的作用是将 Rogowski 线圈的输出电压进行积分，即：

$$u^*(t) = \int_0^t u(t)dt = \int_0^t M \frac{di}{dt} dt = Mi(t) - Mi(0) \quad (11)$$

设：

a) $t=0$ 为监测系统安装时刻，此时绝缘子无闪络故障，其中流过很小的泄漏电流。

b) $t=a$ 为闪络发生时刻，此时绝缘子流过很大的闪络电流。

则：

$$u^*(a) = Mi(a) - Mi(0) \approx Mi(a) \quad (12)$$

也就是说，在绝缘子发生闪络时，积分电路将 Rogowski 线圈的输出电压通过积分转变成和绝缘子中流过电流成正比的电压量

2.2.2 工作过程

泄漏电流和闪络电流在瞬时值的大小上看区别亦非常明显，若泄漏电流和闪络电流的最大值的分界值 i_{set} （瞬时值）、光耦的发光二极管开启电压

U_{TH} 均已确定，则通过选择合适的 Rogowski 线圈

互感 M、增益调整电路调整系数 A，即可实现图 4 系统对绝缘子闪络故障的快速监测。

可以看出，当 M、A 满足下面的关系就能实现上述功能：

$$MAi_{set} = U_{TH} \quad (13)$$

$$\Rightarrow MA = \frac{U_{TH}}{i_{set}} \quad (14)$$

当绝缘子没有发生闪络故障时，绝缘子流过的电流为毫安级别的泄漏电流，此时 $|i_1| < |i_{set}|$ ，即：

$$|MAi_1| < U_{TH} \quad (15)$$

也就是说此时光耦 IC1 及 IC2 内发光二极管均不发光，光敏三极管截止，触发器不动作，Q 输出始终为 0。

当绝缘子发生闪络故障时, 绝缘子流过的电流为闪络电流, 此时 $|i| > |i_{set}|$, 即:

$$|MAi_1| > U_{TH} \quad (16)$$

也就是说此时光耦 IC1 或 IC2 内发光二极管发光, 对应光敏三极管导通, 触发器立即动作, Q 输出为 1 并保持。

3 改进的闪络监测系统相关电气量波形图

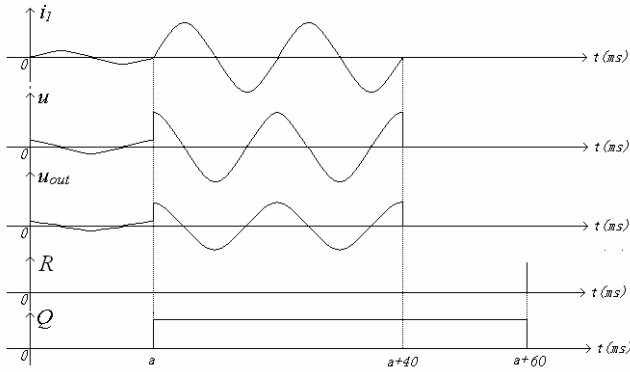


图 5 第一种改进的闪络监测系统相关电气量波形图

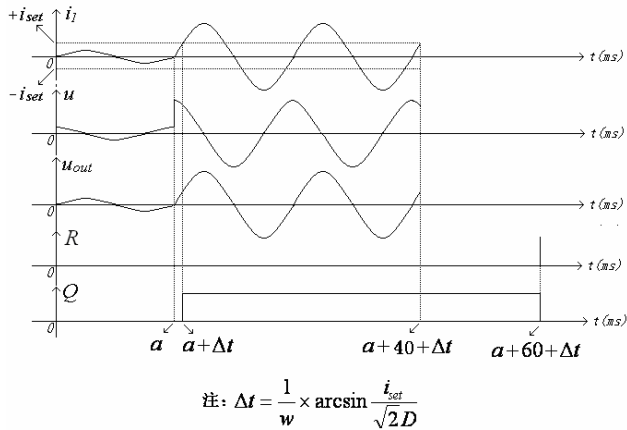


图 6 第二种改进的闪络监测系统相关电气量波形图

发生故障后图 2 或图 4 系统的输出 Q 可与二次装置配合, 先于主设备保护作用于绝缘子相邻断路器跳闸, 快速切除故障, 避免由采样数据窗带来的延时。若假设:

a) 绝缘子在 $t=a$ 时发生闪络故障, $t=a^-$ 时绝缘子泄漏电流过零。

b) 绝缘子相邻断路器开断时间为 40ms

$$c) \quad wa + \varphi = -\pi/2 + 2k\pi \quad (17)$$

d) S1 开关放在 1 位置

f) J 整定为 60ms

则通过上文分析可知, 闪络故障发生后图 2 及

图 4 系统相关电气量的波形如图 5 及图 6 所示。

不难看出对于图 6, 若绝缘子闪络电流有效值 D、监测系统电流定值 i_{set} 已确定, 则可计算出闪络发生时刻与监测系统响应时刻的时间差 Δt :

$$\sqrt{2}D \sin(w \times \Delta t) = i_{set} \quad (18)$$

$$\Rightarrow \Delta t = \frac{1}{w} \times \arcsin \frac{i_{set}}{\sqrt{2}D} \quad (19)$$

4 改进的闪络监测系统在闪络预警中的应用

绝缘子绝缘异常发展成闪络故障需要一定时间, 泄漏电流的异常变大可作为绝缘闪络预警的依据。可以看出图 2 和图 4 系统中, 若定值 I_{set} 或 i_{set} 选择为闪络预警值 (毫安级别), 且输出 Q 不作用于跳闸时, 这两个系统均可作为闪络预警系统。当泄漏电流超过定值时, 监测系统可通过多种方式作用于报警 (如“声”、“光”、“光字牌”), 为设备状态诊断提供参考。

5 结束语

本文提出了两种改进的绝缘子闪络快速监测系统, 这两种系统可避免泄漏电流带来的负面影响。当选择合适的参数时, 这两种系统亦可实现绝缘子闪络预警功能, 为绝缘子运行状态的诊断提供参考。

参考文献:

- [1] 刘志学, 李诗华, 单鸿旭, 等. 基于 Rogowski 线圈原理的变电站绝缘子闪络快速监测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011(13).
- [2] 张红岭, 王海明, 郑绳植. Rogowski 线圈的结构与电磁参数的研究[J]. 高电压技术, 2006 (6): 21-24.
- [3] 康华光. 电子技术基础数字部分第四版[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.21-24.

作者简介:

刘志学(1985-), 男, 本科, 助理工程师, 从事超高压变电运行工作, Email: liuzhixue2008@yahoo.com.cn。