

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: 分析了现有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 2 种改进的监测系统,这 2 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,2 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;2 种系统均增加了防信号过冲功能以及自动复归功能。当选择合适的电流定值时,所提的 2 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; 预警; 状态诊断; 基本 RS 触发器; Rogowski 线圈; 光耦; 绝缘子

中图分类号: TM 85 **文献标识码:** B DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.029

0 引言

绝缘子闪络对电力系统的安全、可靠、稳定运行有较大的负面影响,覆冰、污秽、过电压等多种因素可能造成绝缘子闪络故障^[1-4]。闪络故障的切除需要一定时间:微机保护采样数据窗使故障切除时间在断路器开断时间的基础上有所增加^[5-10];对于某些特殊位置(如超高压电网保护死区范围)的绝缘子闪络故障必须通过失灵保护切除,而现有失灵保护具有较长延时^[11-13]。切除闪络故障所需的时间越长对系统暂态稳定的影响越大。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,则可成功解决上述 2 个问题^[14]。

文献[14]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可能会误动作。本文提出了 2 种改进方案,这 2 种方案均能消除泄漏电流带来的影响,且如果参数选择适当,2 种方案亦可实现绝缘子闪络预警功能。

1 文献[14]所提绝缘子闪络快速监测系统

1.1 主要元件情况

文献[14]设计了一种绝缘子闪络快速监测系统(见图 1),其 Rogowski 线圈输出电压^[15]见式(1),2 个或非门组成的基本 RS 触发器的功能表^[16]见表 1。

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

其中, i_1 为 Rogowski 线圈所包络的电流。

1.2 工作原理^[14]

a. 当绝缘子无闪络故障时,Rogowski 线圈包络

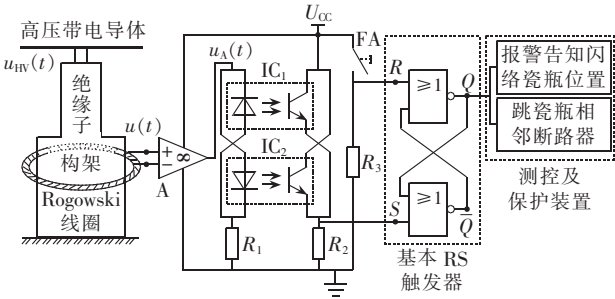


图 1 文献[14]提出的绝缘子闪络快速监测系统
Fig.1 Insulator flashover rapid monitoring system
proposed by reference[14]

表 1 基本 RS 触发器的功能表
Tab.1 Functions of fundamental RS trigger

R	S	Q
0	1	1
1	0	0
0	0	不变
1	1	不定

电流为零,无限大增益运放 A 的输出电压为 0,2 个光耦的发光二极管均不发光,光敏三极管截止,触发器 S 端输出始终为 0,触发器不动作。

b. 绝缘子闪络瞬间,无限大增益运放 A 的输入电压差 $u(t) \neq 0$,其输出电压的绝对值瞬时突变为偏置电压 U_{CC} ,光耦 IC₁ 或 IC₂ 内的发光二极管发光,对应光敏三极管导通,触发器 S 端输出突变为 1,触发器动作,Q 端瞬时置 1 并保持。

c. 发生故障后 Q 端可与保护装置配合,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 端还可与测控装置配合作用于后台报警,告知运行人员闪络绝缘子位置,为事故处理提供参考。故障处理完毕后需手按 FA 按钮(先合后分),恢复 RS 触发器初始状态。

d. 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 ns 级,总时间对于电力系统而

言可忽略不计,即可认为监测系统为瞬时响应。

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为一个相对较大的有限值,若此时选择合适的 Rogowski 线圈互感,则可认为绝缘子正常时泄漏电流的响应电压 $u_A \approx 0$,这个小电压一般不会使光耦内二极管动作。但是文献[14]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,由理论分析可知,若考虑泄漏电流,则图 1 所示系统在绝缘子正常运行时可能会误动作。

2 2 种改进的绝缘子闪络快速监测系统

本文提出了 2 种改进的绝缘子闪络快速监测系

统,这 2 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,同时还增加了防信号过冲功能以及自动复归功能。

2.1 第 1 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 1 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 3 点不同。

a. 增加了双向击穿二极管 V_D 。双向击穿二极管 V_D 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。

b. 将无限大增益运放换成了增益调整电路。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)地转换为光耦电路的输入电

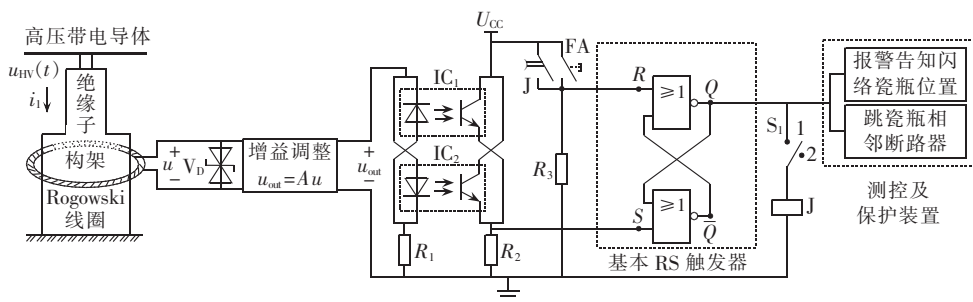


图 2 改进的绝缘子闪络快速监测系统 1

Fig.2 Improved insulator flashover rapid monitoring system 1

压 u_{out} (即实现 $u_{out} = Au$), 该电路可通过多种方式实现, 本文给出了一种简单的实现方式, 如图 3 所示。

c. 增加了自动/手动复归选择开关 S_1 和时间继电器 J 及其辅助触点(延时闭合瞬时断开常开触点)。自动/手动复归选择开关 S_1 、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 S_1 在位置 2 时为手动复归方式, 时间继电器 J 退出使用, 监测系统动作切除闪络故障后需人工手动复归(使 FA 触点先合后分), 复归后 Q 端输出为 0; 当 S_1 在位置 1 时为自动复归方式, 时间继电器 J 投入使用, 监测系统动作(Q 端置 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 端置 0, 然后时间继电器 J 失电, 触点 J 断开, Q 端保持为 0。时间继电器 J 的动作时刻应滞后于闪络故障消失时刻并留有一定裕度, 即延迟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 mA 级, 而闪络电流一般可达 kA 级, 即可从电流大小明确区分泄漏电流和闪络电流。若泄漏电流和闪络电流的分界

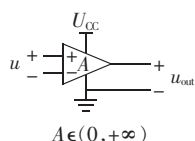


图 3 一种增益调整电路

Fig.3 A kind of gain adjustment circuit

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 满足式(2)、(3)时, 图 2 所示系统就能实现绝缘子闪络的快速监测功能。

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

$$AM = \frac{U_{th}}{\sqrt{2} \omega I_{set}} \quad (3)$$

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

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

此时光耦 IC_1 及 IC_2 内发光二极管均不发光, 光敏三极管截止, 触发器不动作, Q 端输出始终为 0。

若 $t=0$ 时刻绝缘子发生闪络故障, 作如下假设。

a. $t=0$ 时刻绝缘子流过的泄漏电流瞬时值为 B 。

b. 绝缘子上的电压为:

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

c. 闪络时绝缘子等效电阻为 R_c 。

不考虑双向击穿二极管 V_D 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:

$$|u_{out}(0^+)| = \left| AM \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{\sqrt{2} U_{HV} \cos(\omega t + \varphi) / R_e - B}{t} \right| = \begin{cases} +\infty & \varphi \neq \pm \arccos \frac{BR_e}{\sqrt{2} U_{HV}} \\ \frac{\sqrt{2} A \omega M U_{HV}}{R_e} \sqrt{1 - \frac{B^2 R_e^2}{2 U_{HV}^2}} & \varphi = \pm \arccos \frac{BR_e}{\sqrt{2} U_{HV}} \end{cases} \quad (6)$$

可以看出式(6)中, $\sqrt{1 - \frac{B^2 R_e^2}{2 U_{HV}^2}} \approx 1$, $\frac{U_{HV}}{R_e}$ 为闪络电流有效值,一般可达几千安培。由于闪络电流和泄漏电流的分界值 I_{set} 可选择得很小(如 10 A 以下),所以通过分析式(2)、(6)可知发生闪络故障时:

$$|u_{out}| \gg U_{th} \quad (7)$$

即闪络时 IC_1 或 IC_2 内发光二极管亮,相应光敏三极管导通, S 端瞬时置 1, Q 端输出为 1 并且保持。

不难看出,若考虑双向击穿二极管 V_D 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} 的最大值会减小,但对其最小值没有影响,即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 端可与保护装置配合,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 端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 S_1 在位置 2,则在故障处理完毕后需手按 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。若开关 S_1 在位置 1,则监测系统经过一定延时后会自自动复归。

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:

$$M = \frac{U_{th}}{\sqrt{2} \omega I_{set}} \quad (8)$$

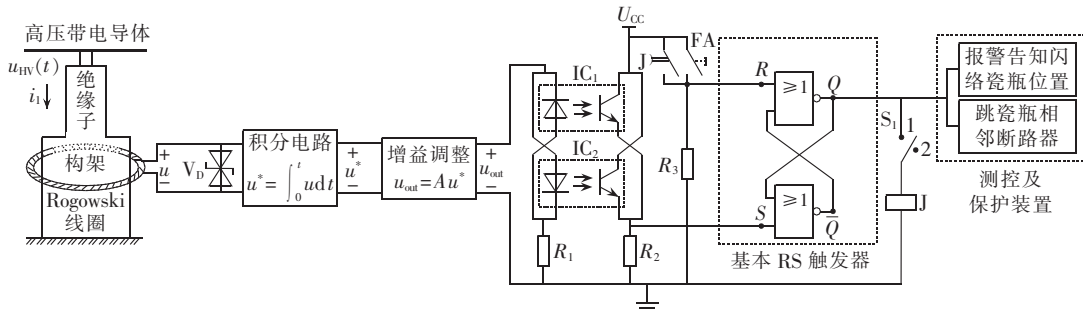


图 4 绝缘子闪络快速监测系统 2

Fig.4 Improved insulator flashover rapid monitoring system 2

2.2 第 2 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 2 种改进的监测系统,它和第 1 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。积分电路的作用是将 Rogowski 线圈的输出电压进行积分,即:

$$u^*(t) = \int_0^t u(t) dt = \int_0^t M \frac{di}{dt} dt = Mi(t) - Mi(0) \quad (9)$$

假设 $t=0$ 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; $t=a$ 为闪络发生时刻,此时绝缘子流过很大的闪络电流。则有:

$$u^*(a) = Mi(a) - Mi(0) \approx Mi(a) \quad (10)$$

即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的瞬时值的大小区别亦非常明显,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。

可见,当 M 、 A 满足下列关系就能实现上述功能:

$$MA i_{set} = U_{th} \quad (11)$$

$$MA = \frac{U_{th}}{i_{set}} \quad (12)$$

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

$$|MA i_1| < U_{th} \quad (13)$$

此时光耦 IC_1 及 IC_2 内发光二极管均不发光,光敏三极管截止,触发器不动作, Q 端输出始终为 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 $|i_1| > |i_{set}|$,即:

$$|MA i_1| > U_{th} \quad (14)$$

此时光耦 IC_1 或 IC_2 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 端输出为 1 并保持。

3 改进的闪络监测系统相关电气量波形图

发生故障后图 2 或图 4 系统的 Q 端可与二次装置配合,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。假设: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;绝缘子相邻断路器开断时间为 40 ms ; $\omega a + \varphi = -\pi/2 + 2k\pi$; 开关 S_1 在位置 1; 时间继电器延时整定为 60 ms 。闪络故障发生后,图 2 及图 4 所示系统相关电气量的波形分别见图 5 及图 6。

图 6 中,若绝缘子闪络电流有效值为 D 、监测系

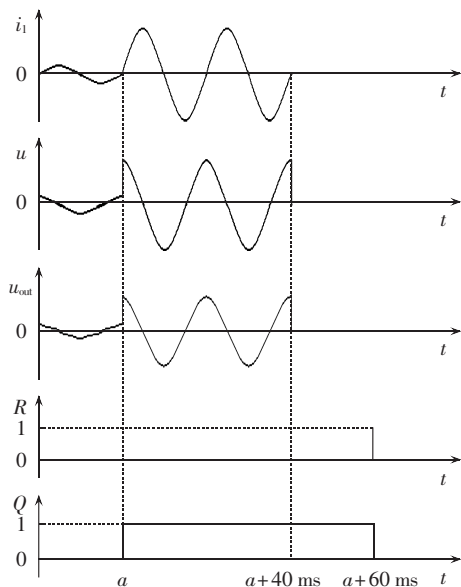


图 5 改进的闪络监测系统 1 相关电气量波形图

Fig.5 Waveforms of relevant electrical parameters of improved rapid monitoring system 1

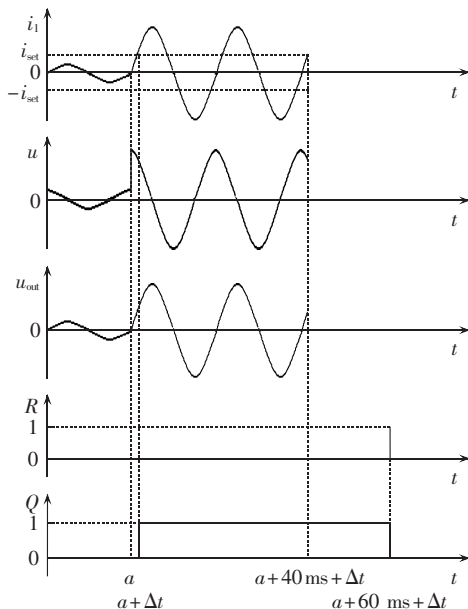


图 6 改进的闪络监测系统 2 相关电气量波形图

Fig.6 Waveforms of relevant electrical parameters of improved rapid monitoring system 2

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 :

$$\sqrt{2} D \sin(\omega \Delta t) = i_{\text{set}} \quad (15)$$

$$\Delta t = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{i_{\text{set}}}{\sqrt{2} D} \quad (16)$$

4 改进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(mA 级),且输出 Q 端不作用于跳闸时,这 2 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 结语

本文提出了 2 种改进的绝缘子闪络快速监测系统,这 2 种系统均可避免泄漏电流带来的负面影响。当选择合适的参数时,这 2 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] 郑欢,江道灼,金文德,等. 基于电磁感应原理的绝缘子防(融)冰技术方案探讨[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):135-138.
ZHENG Huan,JIANG Daozhuo,JIN Wende,et al. Insulator deicing based on electromagnetic induction principle[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):135-138.
- [2] 王成江,李光. 基于声发射技术的绝缘子放电识别用特征量研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):143-148.
WANG Chengjiang,LI Guang. Characteristic analysis on acoustic emission signals of insulator discharge[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):143-148.
- [3] 李明,舒乃秋,彭旭东,等. 基于声发射技术的绝缘子污秽放电监测[J]. 电力自动化设备,2004,24(6):98-100.
LI Ming,SHU Naiqiu,PENG Xudong,et al. Insulator contaminant flashover monitoring based on acoustic emission technique[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(6):98-100.
- [4] 刘志学,崔屹平. 便携式支持绝缘子泄漏电流带电检测系统[J]. 电工技术,2011(5):22-23.
LIU Zhixue,CUI Yiping. Portable monitoring system for post insulator leakage current[J]. Electric Engineering,2011(5):22-23.
- [5] 安林,吴济安. 基于调整滤波器初相位的新型半波傅里叶算法[J]. 电力自动化设备,2004,24(10):19-23.
AN Lin,WU Ji'an. Half-wave Fourier algorithm based on adjusting initial phase of filter[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(10):19-23.
- [6] 项巍,吕航,李力,等. 母线保护中电流互感器的深度饱和辅助判据[J]. 电力自动化设备,2005,25(9):39-42.
XIANG Wei,LÜ Hang,LI Li,et al. Distinguish current transformer's extreme saturation by waveform discrimination of branch

- current[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(9):39-42.
- [7] 程鹏,陆于平. 一种进行幅值和相位校正的微机保护新算法[J]. 电力自动化设备,2000,20(1):4-6.
- CHENG Peng,LU Yuping. A new algorithm to adjust amplitude and phase angle for microprocessor based relay[J]. Electric Power Automation Equipment,2000,20(1):4-6.
- [8] 李瑞生,路光辉,王强. 用于线路差动保护的电流互感器饱和判断[J]. 电力自动化设备,2004,24(4):70-73.
- LI Ruisheng,LU Guanghui,WANG Qiang. Transformer saturation criterion for line differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(4):70-73.
- [9] 浦南桢,翟学锋,袁宇波,等. P级TA饱和对数字比率制动特性差动保护的影响[J]. 电力自动化设备,2003,23(4):76-80.
- PU Nanzhen,ZHAI Xuefeng,YUAN Yubo,et al. Impaction of P-type CT saturation on digital ratio-restrained differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(4):76-80.
- [10] 姚亮,胡再超,杭泱. 常见傅里叶变换的滤波性能分析[J]. 电力自动化设备,2008,28(1):73-76.
- YAO Liang,HU Zaichao,HANG Yang. Performance analysis of filtering algorithms based on Fourier transform[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(1):73-76.
- [11] 刘志学,单鸿旭,李诗华. 高压电力系统死区保护的一种实现方法[J]. 电工技术,2010(12):52-54.
- LIU Zhixue,SHAN Hongxu,LI Shihua. A realization of dead-zone relay in HV electric system[J]. Electric Engineering,2010(12):52-54.
- [12] 刘志学. 带有自动重合闸功能的断路器失灵保护[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):147-151.
- LIU Zhixue. Breaker failure protection with autoreclosure[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):147-151.
- [13] 刘志学,单鸿旭. 超高压电力系统双断口断路器内部故障保护的一种实现方法[J]. 电工技术,2010(6):65-66.
- LIU Zhixue,SHAN Hongxu. A realization of double-break breaker's inter fault relay in EHV electric system[J]. Electric Engineering,2010(6):65-66.
- [14] 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,2011,39(13):126-129,133.
- LIU Zhixue,LI Shihua,SHAN Hongxu,et al. Method based on Rogowski coil theory for rapid monitoring insulator flashover in substation[J]. Power System Protection and Control,2011,39(13):126-129,133.
- [15] 张红岭,王海明,郑绳楦. Rogowski 线圈的结构与电磁参数的研究[J]. 高压技术,2006,32(6):21-24.
- ZHANG Hongling,WANG Haiming,ZHENG Shengxuan. Study of dimensions and electromagnetic parameters of Rogowski coils[J]. High Voltage Engineering,2006,32(6):21-24.
- [16] 康华光. 电子技术基础数字部分[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,1999:179-183.
-
- 作者简介:**
- 刘志学(1985-),男,湖北大冶人,助理工程师,从事超高压变电运行工作(E-mail:liuzhixue2012@gmail.com)。

Improved insulator flashover monitoring systems

LIU Zhixue

(Suzhou Department of Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company,Suzhou 215000,China)

Abstract: The performance of present insulator flashover rapid monitoring systems and its existing problems are analyzed. Two kinds of improved monitoring system are proposed,which monitor respectively the RMS and instantaneous values of insulator current for the detection of flashover. When the relationship between the adjustment multiple of gain adjustment circuit and the mutual inductance of Rogowski coil satisfies a certain condition,the harmful impact caused by the insulator leakage current to the monitoring systems can be successfully avoided. The automatic-reset function and the anti-signal-overshoot function are added to the improved systems. The flashover warning function can be implemented in the improved systems if suitable current setting is configured,which is useful for the insulator state diagnosis.

Key words: flashover; monitoring; warning; state diagnosis; fundamental RS trigger; Rogowski coil; optical coupler; electric insulators