

一种断路器对地及断口绝缘故障快速监测方法

刘志学^{1,2}

(1. 江苏省电力公司检修分公司苏州检修分部,江苏 苏州 215000;2. 苏州供电公司,江苏 苏州 215000)

摘要: 提出了一种断路器对地及断口绝缘故障快速监测方法,并通过该方法设计了一套监测系统。该监测系统由对地绝缘故障瞬时判别电路和断口绝缘故障延时判别电路组成,当断路器发生对地绝缘故障/断口绝缘故障时该系统能瞬时/快速响应,且该系统在断路器正常运行时不存在误判的可能。提出的监测系统可与断路器失灵保护跳闸回路配合使用,在发生断路器对地或断口绝缘故障时立即作用于相邻断路器跳闸,避免失灵保护长延时切除该故障对电网、设备和人身安全带来的危害。

关键词: 断路器; 对地绝缘故障; 断口绝缘故障; 监测; 失灵保护; 暂态稳定

中图分类号: TM 561

文献标识码: B

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.029

0 引言

高压断路器导电部分的对地绝缘及断口之间的绝缘一般通过支柱或支持绝缘子、套管、绝缘拉杆、气体或液体介质、灭弧绝缘筒或瓷套实现^[1-6]。若上述部件出现缺陷,则可能造成断路器对地或断口绝缘故障。目前断路器绝缘故障的切除时间一般是保护采样数据窗时间、保护延时、断路器开断时间三者之和,此时间越长,对电网的暂态稳定、相邻设备的正常运行和人身安全的负面影响越大。本文提出了一套断路器对地及断口绝缘故障快速监测系统,其与失灵保护跳闸回路配合使用时,可在断路器发生对地或断口绝缘故障时快速作用于相邻断路器跳闸,避免保护采样数据窗时间和保护延时带来的危害。

现有文献提出的断路器绝缘监测方法很多,它们都是通过断路器的各种外部特征判断断路器的绝缘性能,如通过监测断路器内部的放电情况^[9-10]、湿度和压力^[11-12]或断路器灭弧室物质的化学成分^[12]来判断绝缘性能。这些方法大多原理复杂,且不能在断路器发生严重绝缘故障后快速响应,即无法和二次装置配合使用以快速切除断路器绝缘故障。

文献[13]提出了一种双断口断路器对地绝缘故障监测的方法,该方法利用双断口断路器横向电磁环境对称的特点来实现对地绝缘故障的监测,进而通过继电保护装置将故障切除。该方法虽然一定程度上实现了双断口断路器对地绝缘故障较为快速的监测,但是不适用于其他类型的断路器,且没有给出双断口断路器断口绝缘故障监测的实现过程。另外该方法在判别故障时存在一定延时,且易受相邻运行设备磁场的干扰而导致误判。

参照文献[13]的双断口断路器对地绝缘故障监测的方法和文献[14]提出的绝缘子闪络监测方法,

本文提出了一种断路器对地及断口绝缘故障快速监测方法。该监测系统适用面广,可用于所有类型的断路器;当断路器发生对地绝缘故障时,该系统能瞬时响应;当断路器发生断口绝缘故障时,该系统能快速响应;当断路器正常运行时,该系统不存在误判的情况。

1 实现断路器对地及断口绝缘故障快速监测的必要性

高压断路器对地或断口绝缘故障的切除一般需通过失灵保护,现有失灵保护的长延时^[7-8]会对电网、设备和人身安全带来一定的负面影响,下面以单断口断路器对地绝缘故障(见图 1)为例进行说明。

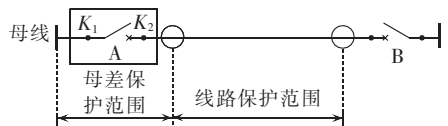


图 1 单断口断路器对地绝缘故障的情况
Fig.1 Grounding fault of mono-break breaker

假设图中线路的 2 套主保护均为分相电流差动保护,则有:当接地点在断口母线侧(K_1 点)时,母差保护动作,跳本侧母线上所有断路器,但断路器 A 的内部绝缘可能在接地时已经损坏,那么母差保护动作跳闸后断路器 A 动静触头间将会有持续不灭的电弧,此时该故障需要通过失灵保护才能切除;当接地点在断口电流互感器侧(K_2 点)时,由于该点属于死区范围,所以该故障仍需通过失灵保护才能切除。高压断路器绝缘故障的切除时间较长会带来两方面的危害。

a. 增加断路器内部的发热。断路器的发热和故障切除时间成正比,所以故障切除时间过长会增加断路器内部的热量积聚,从而可能引起断路器爆炸事故,对相邻运行设备和现场人员的安全造成威胁。

b. 对电网的暂态稳定造成负面影响。较长的故障切除时间会使系统中发电机功角特性曲线的故障切除角变大,加速面积增加,即转子在电网故障期间动能的积累增大,功角恢复稳定的时间延长。

若能实现断路器绝缘故障的快速监测,并与失灵保护的跳闸回路配合,跳开与故障断路器相邻的断路器,就可快速切除故障,避免故障切除时间较长。

2 断路器对地及断口绝缘故障快速监测系统

本文提出的断路器对地及断口绝缘故障快速监测系统原理如图 2 所示。

2.1 监测系统的组成

监测系统由 Rogowski 线圈、或非门组成的基本 RS 触发器、无限大增益运算放大器、电阻、双向击穿二极管、光耦、断路器辅助开关、时间继电器及其辅助开关组成。

本系统可分成对地绝缘故障瞬时判别电路和断口绝缘故障延时判别电路 2 个部分,它们分别实现对断路器对地绝缘击穿和断口绝缘击穿的监测功能。

2 个 Rogowski 线圈的型号相同,分别置于断路器的 2 个极端,且朝向相同(如正面都朝上)。2 个线圈的引出端子串联后接到对地绝缘故障瞬时判别电路中的运算放大器 A_1 的输入端。线圈 1 还通过断路器辅助开关 QF 和断口绝缘故障延时判别电路中的运算放大器 A_2 的输入端相连。

传统的 Rogowski 线圈是均匀密绕在环形非磁性骨架上的空心螺线管,具有无饱和、响应速度快

等特点,其输出电压能准确反映所包罗电流的导数的大小。若设 i 为 Rogowski 线圈所包罗电流,则图 2 中 Rogowski 线圈的输出电压为^[15]:

$$u(t)=M\frac{di(t)}{dt}=\frac{NS}{l}\mu_0\frac{di(t)}{dt}$$
 (1)

其中, M 为线圈互感, S 为线圈截面积, N 为线圈匝数, l 为线圈总长度。由式(1)可知,Rogowski 线圈的输出电压仅和所包罗的电流有关,不受外部磁场的干扰和影响。

由或非门组成的基本 RS 触发器功能^[16]如表 1 所示。

表 1 基本 RS 触发器的功能表

Tab.1 Functions of fundamental RS trigger

$R(R^*)$	$S(S^*)$	$Q(Q^*)$
0	1	1
1	0	0
0	0	保持
1	1	不定

图 2 所示系统首次使用前,需对基本 RS 触发器进行初始化,即使 FA_1 和 FA_2 复归按钮先合后分,这样 $R(R^*)$ 端会先置 1 再置 0。初始化后触发器输入 $R(R^*)$ 端、 $S(S^*)$ 端为 0,输出 $Q(Q^*)$ 端为 0。

图 2 中,QF 为断路器的辅助开关,断路器合闸时 QF 分开,断路器分闸时 QF 合上;双向击穿二极管 V_{D1} 和 V_{D2} 起到了信号过冲保护的作用。二极管反向击穿电压可防止 Rogowski 线圈输出信号过大而损坏电子元器件,从而提高了监测系统的可靠性;所有电阻及光耦的型号和参数可任意选择,没有限制。

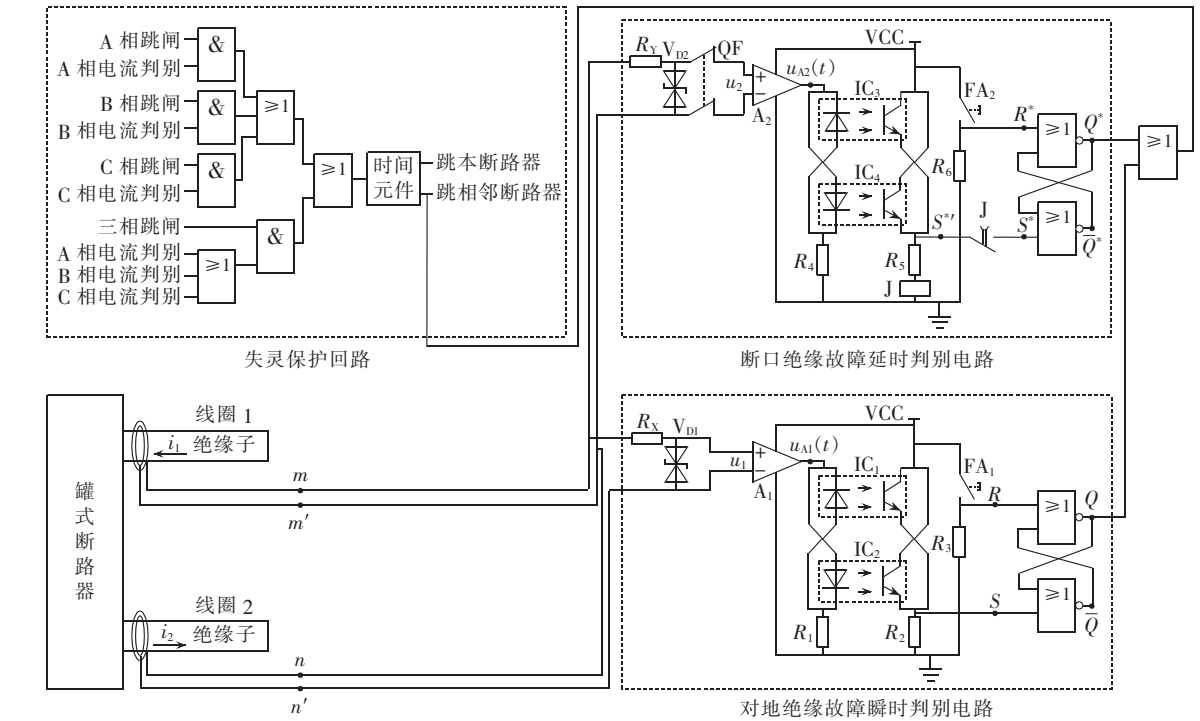


图 2 断路器对地及断口绝缘故障快速监测系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of rapid monitoring system for grounding and break faults of breaker

2.2 对地绝缘故障瞬时判别电路的工作过程

对地绝缘故障瞬时判别电路在断路器分、合闸时都能瞬时监测断路器内部导电部分对地绝缘击穿。

若设图 2 中线圈 1 所包罗的电流为 i_1 , 线圈 2 所包罗的电流为 i_2 , 断路器对地绝缘故障时短路电流为 i_3 , 则可进行如下分析。

断路器无对地绝缘故障时, A_1 的输入为:

$$u_1 = M \frac{di_1(t)}{dt} - M \frac{di_2(t)}{dt} = M \frac{d[i_1(t) - i_2(t)]}{dt} = M \frac{di_3(t)}{dt} = 0 \quad (2)$$

此时 A_1 的输出电压为 0, 光耦 IC₁ 及 IC₂ 中的发光二极管都不发光, 2 个光敏三极管截止; 触发器的 R 端和 S 端状态恒为 0, 触发器不动作, 即断路器无对地绝缘故障时触发器输出 Q 端始终为 0。

若 $t=0$ 时断路器发生绝缘故障, 假设: 接地电阻为 R , 高压带电导体电压 $u_{HV}(t) = \sqrt{2} U_{HV} \cos(\omega t + \varphi)$, 则此时:

$$u_1 = M \frac{di_3(t)}{dt} = M \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{\sqrt{2} U_{HV} \cos(\omega t + \varphi) / R - 0}{t} = \begin{cases} \infty & \varphi \neq \pi/2 + k\pi \\ -\sqrt{2} \omega M U_{HV} / R & \varphi = \pi/2 + 2k\pi \\ \sqrt{2} \omega M U_{HV} / R & \varphi = -\pi/2 + 2k\pi \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知, 断路器发生对地绝缘故障的瞬间 $u_1 \neq 0$, 则此时运算放大器的输出瞬时突变为偏置电压 +VCC 或 -VCC, 光耦 IC₁ 或 IC₂ 内的发光二极管发光, 光敏三极管相应导通, 触发器 S 端瞬时置 1, Q 端输出为 1, 且由于 R 端恒为 0, 由表 1 可知 Q 端输出保持。触发器的 Q 端可作为开入量接入失灵保护的跳闸回路, 作用于相邻断路器跳闸, 快速切除故障。

由于 2 个 Rogowski 线圈的输出电压仅和其所包罗的电流有关, 不受相邻运行设备产生磁场的干扰和影响, 所以在没有发生对地绝缘故障时本监测系统不存在误判的可能。

故障处理完毕后需使 FA₁ 按钮先合后分, 让 R 端先置 1 再置 0, 恢复基本 RS 触发器的初始状态。

2.3 断口绝缘故障延时判别电路的工作过程

断口绝缘故障延时判别电路能在断路器分闸时实现断路器断口绝缘击穿的监测功能。断口绝缘故障延时判别电路和对地绝缘故障瞬时判别电路的结构相似, 只是增加了断路器辅助开关 QF、时间继电器 J 及其辅助开关。时间继电器延时为 T , 其辅助开关可实现延时闭合瞬时断开功能。

不难看出, 断口绝缘故障延时判别电路和对地绝缘故障瞬时判别电路的工作过程类似: 当断路器分闸时, 开关 QF 合上, 断口绝缘故障延时判别电路投入使用, 若某时刻断口绝缘击穿, 则由类比上文的

分析可知 S^* 端立即置 1, 由于时间继电器的存在, S^* 端经延时 T 后置 1, 即 Q^* 端会在发生断口击穿延时 T 后输出为 1 并保持。 Q^* 端可作为开入量接入失灵保护的跳闸回路, 作用于相邻断路器跳闸, 快速切除故障。当断路器合闸时, 辅助开关 QF 分开, 断口绝缘故障延时判别电路退出使用。

装设时间继电器 J 是为了消除断路器内部电弧通断时刻和辅助开关 QF 分合时刻不同步带来的危害。QF 合上时刻(分开时刻)和断路器内部电弧熄灭时刻(燃弧时刻)的不同步会使监测系统产生误判: 当断路器分闸时, 若开关 QF 先合上而断路器电弧后熄灭, 那么这段时间内 Rogowski 线圈输出始终有电压, 通过分析可知, S^* 端会置 1, 如果不装设时间继电器 J 及其接点, 那么此时判别电路会由于这个“不同步”的时间误动作, 而装设了时间继电器且整定一定延时后, 可以避免误动情况的发生; 当断路器合闸时, 对于断路器触头间先产生电弧而开关 QF 后分开的情况可进行相似分析。

时间继电器的延时应同时大于开关 QF 合位时刻与断路器触头电弧完全熄灭时刻的时间差、断路器触头产生电弧时刻与开关 QF 分位时刻的时间差。但延时并不是越长越好, 延时越长, 故障切除时间越长, 对电网暂态稳定、设备及人身安全越不利。

2.4 监测系统的响应时间

基本 RS 触发器与其他带有时序电路的触发器相比, 其动作时间不受时序电路脉冲周期的影响, 仅由或非门内晶体管的传输延迟决定, 此延迟极小, 可达纳秒级。

断路器发生对地绝缘故障时, 图 2 所示系统的响应时间由运算放大器的传输延迟、光耦内晶体管的传输延迟和触发器的触发时间组成, 每部分的时间都仅由其内部晶体管的传输时间决定, 可达纳秒级, 总时间对于电力系统而言可忽略不计, 即可看作是瞬时的, 而断路器发生断口绝缘故障时系统的响应时间可认为仅是时间继电器的整定延时。

2.5 发生绝缘故障时相关电气量波形图

若假设:

- a 时刻断路器发生对地或断口绝缘故障;
- b 时刻监测系统手动复归;
- 相邻断路器的开断时间(分闸时间和电弧燃烧时间之和)为 60 ms;
- 时间继电器 J 整定延时为 10 ms;
- 高压带电导体电压 $u_{HV}(t) = \sqrt{2} U_{HV} \cos(\omega t + \pi/2)$;
- 发生故障的时刻 a 满足 $\omega a = \pi$ 。

则发生断路器对地绝缘故障时的相关电气量波形图如图 3 所示, 发生断路器断口绝缘故障时的相关电气量波形图如图 4 所示。图中, s_{IC1} 、 s_{IC2} 、 s_{IC3} 、 s_{IC4}

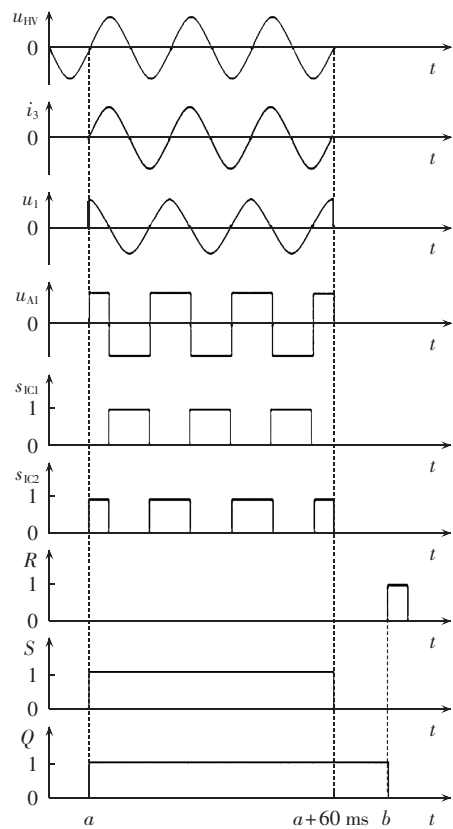


图 3 断路器发生对地绝缘故障时监测系统相关波形图

Fig.3 Grounding-fault-related waveforms of monitoring system

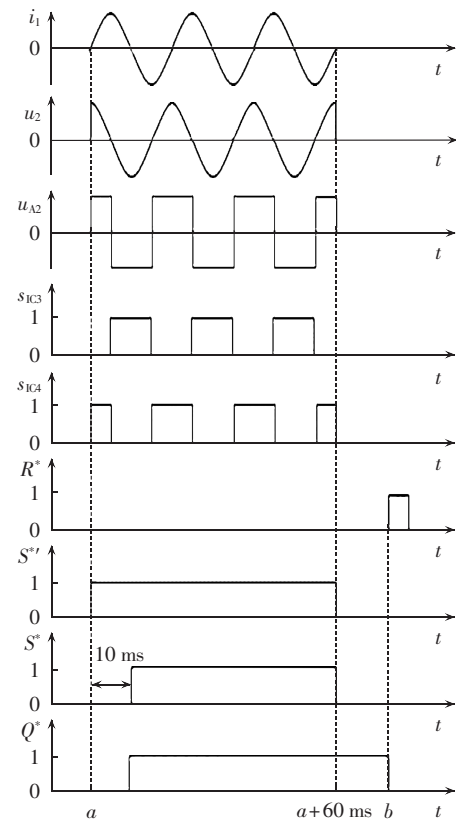


图 4 断路器发生断口绝缘故障时监测系统相关波形图

Fig.4 Break-fault-related waveforms of monitoring system

表示 4 个光耦的通断情况,“1”为导通,“0”为截止。

根据图 3,该断路器对地绝缘故障在 a 时刻发生,此时接地电流 i_3 产生。由式(2)、(3)可知,此时图 2 中运算放大器 A_1 的输入电压 $u_1 > 0$,即此时 A_1 的输出电压为正的电源偏置电压 VCC ,那么这时光耦 IC_2 内发光二极管发光,光敏三极管导通,基本 RS 触发器立即触发。触发器的输出 Q 通过故障断路器的失灵保护跳闸回路快速地向相邻断路器的跳闸线圈发跳令。待相邻的所有断路器可靠断开后(动静触头完全分开且电弧熄灭),该断路器接地绝缘故障切除。 b 时刻基本 RS 触发器手动复归,其输出 Q 归零。

对于图 4,假设该断路器正常运行在热备用状态,而在 a 时刻发生断口击穿故障,击穿时产生断口电流 i_1 。则类比式(1)—(3)可知,此时图 2 中运算放大器 A_2 的输入电压 $u_2 > 0$,即此时运放 A_2 的输出电压为正的电源偏置电压 VCC ,那么这时光耦 IC_4 内的发光二极管发光,光敏三极管导通, S^* 置高电平,经过时间继电器 J 的延时之后继电器辅助接点 J 闭合,之后 S^* 置高电平,基本 RS 触发器触发。触发器的输出 Q 通过故障断路器的失灵保护跳闸回路给相邻断路器的跳闸线圈发跳令。待相邻的所有断路器可靠断开后(动静触头完全分开且电弧熄灭),该断路器断口绝缘故障切除。 b 时刻基本 RS 触发器手动复归,其输出 Q 归零。

过电压入侵也是造成断路器绝缘故障的因素之一。从上文可知,对于过电压入侵的情况,在产生绝缘击穿电流的瞬时,图 2 所示监测系统的动作过程与工频电压下发生绝缘故障的动作过程相似,同样可以成功响应;当过电压入侵造成断路器对地绝缘故障击穿时,图 2 所示系统能瞬时响应;当过电压入侵造成断路器断口绝缘击穿时,图 2 所示系统经延时 T 后能快速响应。

3 结语

本文提出了一种断路器对地及断口绝缘故障快速监测方法,当由该方法实现的监测系统与失灵保护的跳闸回路配合使用时,可以在发生断路器绝缘故障时快速切除故障,避免长时间切除故障带来的危害。

参考文献:

[1] 张全元. 变电运行现场技术问答[M]. 北京:中国电力出版社, 2003:92.
[2] 党向东. 断路器绝缘拉杆的可靠性验证[J]. 高压电器,2010,46 (8):63-65.
DANG Xiangdong. The reliability verification of the insulation pull rod in circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2010,46 (8):63-65.
[3] 徐建源,任春为,王博. 户外真空断路器绝缘强度的分析[J]. 高

- 压电器,2006,42(5):324-327.
- XU Jianyuan,REN Chunwei,WANG Bo. Analysis of insulation strength of 12 kV outdoor circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2006,42(5):324-327.
- [4] 冯亚清,马志瀛,刘韬,等. 真空断路器灭弧室外表面绝缘及其电场计算[J]. 高电压技术,2003,29(3):18-20.
- FENG Yaqing,MA Zhiying,LIU Tao,et al. Electric field calculation for interrupter's surface of the vacuum circuit breaker and it's insulation[J]. High Voltage Engineering,2003,29(3):18-20.
- [5] 尹承尚. SF₆断路器水份含量对内绝缘的影响[J]. 高压电器技术,1996(4):63-64.
- YIN Chengshang. The influence brought by moisture content to internal insulator in SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus Engineering,1996(4):63-64.
- [6] 陆以安. 柱上真空断路器用绝缘套管[J]. 高压电器,2000,36(5):40-41.
- LU Yian. Insulating bushing for on-post vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2000,36(5):40-41.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 胡涛,刘海峰,杜大全. 550 kV 罐式断路器局部放电在线检测[J]. 高压电器,2008,44(4):378-380.
- HU Tao,LIU Haifeng,DU Daquan. Online detection of partial discharge for a 550 kV tank breaker[J]. High Voltage Apparatus,2008,44(4):378-380.
- [10] 杨钦慧. 罐式断路器绝缘诊断装置的开发[J]. 江苏电器,2001(5):1-4.
- YANG Qinhui. R & D on GCB & VCB insulation diagnose device[J]. Jiangsu Electrical Apparatus,2001(5):1-4.
- [11] 胡晓光,孙来军. SF₆断路器在线绝缘监测方法研究[J]. 电力自动化设备,2006,26(4):1-3.
- HU Xiaoguang,SUN Laijun. Research on insulation monitoring of SF₆ circuit breaker[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(4):1-3.
- [12] 易慧,尹项根,胡文平,等. 断路器综合在线监测分析[J]. 水电能源科学,2006,24(6):87-92.
- YI Hui,YIN Xianggen,HU Wenping,et al. Comprehensive on-line monitoring and measurement analysis of circuit breakers[J]. Water Resources and Power,2006,24(6):87-92.
- [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,郑绳榼. Rogowski 线圈的结构与电磁参数的研究[J]. 高电压技术,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)。

Rapid monitoring method for breaker's grounding and break faults

LIU Zhixue^{1,2}

(1. Suzhou Department of Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company,Suzhou 215000,China;

2. Suzhou Power Supply Company,Suzhou 215000,China)

Abstract: A method of rapid monitoring is proposed for the grounding fault and break fault of breaker, based on which,a monitoring system is designed. It consists of the instantaneous discrimination circuit for the instantaneous response to grounding fault and the delayed discrimination circuit for the fast response to break fault,without any possibility of misjudgment during the normal operation of breaker. It can also be used in conjunction with the trip circuit of failure protection to instantly trip the adjacent breaker during the grounding fault or break fault,which avoids the possible harm caused by the long delayed trip of failure protection to grid,equipment and personnel.

Key words: electric breakers; grounding fault; break fault; monitoring; failure protection; transient stability