

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202084

一二次配合的配电线路自适应重合闸

刘健^{1,2}, 张志华^{1,2}, 芮俊³, 孟乐⁴, 颜云飞⁵, 闫飞¹

(1. 西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100;

3. 安徽一天电气技术股份有限公司, 安徽 合肥 230088; 4. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000;

5. 安徽合凯电气科技有限公司, 安徽 合肥 231131)

摘要: 针对配电线路常规重合闸因重合前不能区分永久性和瞬时性故障可能造成多次短路冲击的问题, 系统论述了基于一二次配合的配电线路自适应重合闸技术。介绍了基于一二次配合的配电线路自适应重合闸4种实现途径, 即: 限流试探法、电容放电试探法、脉冲试探法和载波试探法。分别论述了限流试探法串联型和并联型两种结构的工作原理以及技术特点, 并给出限流阻抗典型参数。理论分析了电容试探法的回路放电特性及阻容参数的选取原则并给出了典型取值。指出脉冲试探法的关键在于分相快速开关的分闸速度和动作离散度, 并建议了脉冲试探法下的阻抗参数识别方法实现原理。给出了载波试探法的信号频率及试探电压的选取原则以及典型值。

关键词: 配电网; 配电线路; 自适应重合闸; 限流试探; 电容放电试探; 脉冲试探; 载波试探

Adaptive reclosing of distribution lines based on primary and secondary device coordination

LIU Jian^{1,2}, ZHANG Zhihua^{1,2}, RUI Jun³, MENG Le⁴, YAN Yunfei⁵, YAN Fei¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Grid Shaanxi Electric Power

Research Institute, Xi'an 710100, China; 3. Anhui One-sky Electric Technology Company Limited, Hefei 230088, China; 4. XJ

Group Corporation, Xuchang 461000, China; 5. Anhui Hekai Electric Technology Company Limited, Hefei 231131, China)

Abstract: Potential multiple short-circuit surges caused by the conventional reclosing of distribution lines do not distinguish permanent from transient faults before reclosing. Thus an adaptive reclosing technology of distribution lines based on primary and secondary device coordination is proposed. Four typical adaptive reclosing methods of distribution lines based on primary and secondary device coordination are introduced. They are the current limiting trial, capacitor discharge trial, pulse trial and carrier wave trial methods. The principle and characteristics of series and parallel current limiters of the current limiting trial method are discussed and a typical impedance of the current limiter is provided. The circuit discharge characteristics of the capacitor discharge trial method and choice principle of resistance and capacitance parameters are analyzed theoretically and the typical parameters are given. It is pointed out that the key technique of the pulse trial method is the opening speed and action dispersion degree of the split phase breaker. The principle of an impedance parameter identification method is proposed. The choice principle of the frequency and voltage test signal and their typical values are given for the carrier wave trial method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1766208).

Key words: distribution networks; distribution lines; adaptive reclosing; current limiting trial; capacitor discharge trial; pulse trial; carrier wave trial

0 引言

配电线路短路故障中瞬时性故障占比较高, 据统计, 架空配电线路超过80%以上的故障为瞬时性

故障^[1], 因而在架空配电线路中广泛采用自动重合闸装置, 可以在瞬时故障时快速恢复对用户的供电。近年来的数据表明, 即使是对于纯电缆线路, 重合闸成功率也在30%以上^[2]。显然, 重合闸对于提升配电系统供电可靠性具有重要意义, 但由于传统重合闸装置在重合前并不区分故障性质, 当重合于永久

基金项目: 国家自然科学基金资助(U1766208)

故障时会带来短路电流的再次冲击, 有可能加重故障后果, 导致故障扩大化, 带来安全隐患^[3-4]。

为了避免重合闸于永久性故障时可能带来的不利后果, 20 世纪 80 年代初葛耀中教授提出了面向输电线路的“自适应重合闸”思想^[5-7], 设想在重合闸前先识别线路故障性质, 再根据故障性质决定是否进行重合。经过 30 余年的发展, 目前在输电线路的故障性质识别方面, 已经取得了大量的研究成果, 从大类上可以划分为: 基于瞬时性故障恢复电压的方法^[8-12]、基于瞬时性故障电弧特性的方法^[13-17]以及基于高频通道信号衰减率的方法^[18]。

相对于输电线路, 有关配电线路的自适应重合闸或故障性质识别技术的研究一直比较少^[19-22], 且配电线路结构和参数特点以及保护动作方式与输电线路存在很大区别。配电系统相间耦合电容小、线路上一般不配置并联电抗器且采用三相跳闸三相重合的保护和重合闸动作方式, 导致输电线路中研究较多的基于瞬时性故障恢复电压的故障性质识别方法在配电线路上的应用困难较大; 而基于瞬时性故障电弧特性的方法则因电弧电压一般不足线路额定电压的 5%, 而在测量、分析和判断中存在可信度的问题, 且电弧故障和瞬时性故障能否等价也仍需进一步探讨。

相比利用故障自身电气量特征的故障性质识别方法, 通过在一次系统中附加注入试探信号的一二次配合自适应重合闸技术方案具有不受配电线路自身结构和参数特点限制的优点, 可以从根本上克服利用线路故障恢复阶段电气量特征或电弧特征故障性质识别方法所面临的困难。本文即结合作者团队的研究成果和发明专利, 论述基于一二次配合的配电线路自适应重合闸的基本原理和关键技术。

1 一二次配合自适应重合闸的实现途径

一二次配合的配电线路自适应重合闸的基本原理是试探法, 在断路器保护动作跳闸后, 在对电网无冲击或微小冲击的条件下, 进行某种试探性操作, 达到区分永久性故障和瞬时性故障的目的。

根据试探原理的不同, 可以分为限流试探法、电容放电试探法、脉冲试探法和载波试探法四个技术路线。

1) 限流试探法

限流试探法是通过在重合回路中串入限流阻抗的方式进行试探性重合, 并检测流过的电流, 如果是瞬时性故障则重合后流过的电流较小, 如果是永久性故障则重合后流过的电流较大, 从而区分出

永久性故障和瞬时性故障, 对于永久性故障则加速断开限流重合回路, 对于瞬时性故障则旁路限流阻抗。

由于试探性重合过程中采取了限流措施, 因此即使重合到永久性故障, 对电网冲击也很小。

限流试探法可以三相同时进行, 只需一次试探性重合即可达到目的。

2) 电容放电试探法

电容放电试探法是投入一组事先充过电的电容到故障馈线上进行试探性操作, 并检测电容电压, 如果是瞬时性故障则电容电压下降到阈值的时间较长, 如果是永久性故障则电容电压下降到阈值的时间较短, 从而区分出永久性故障和瞬时性故障。然后退出试探电容组, 对于永久性故障不重合断路器, 对于瞬时性故障则令断路器重合。

由于电容充电电压较低且存储电量较小, 在试探性操作过程中即使遇到永久性故障, 对电网的冲击也很小。

电容放电试探法需要根据故障选相结果相应地对 AB 相间、BC 相间和 CA 相间进行试探性重合。

3) 脉冲试探法

脉冲试探法是采用快速开关, 在电压过零点附近极短时间合闸又迅速分闸, 形成一个很小的电压脉冲对故障馈线上进行试探性重合, 并检测馈线的阻抗, 如果是瞬时性故障则重合后阻抗较大, 如果是永久性故障则重合后阻抗较小, 从而区分出永久故障和瞬时性故障。对于永久性故障则不再重合断路器, 对于瞬时性故障则令断路器再次重合。

由于仅在电压过零点附近短暂重合, 馈线上的电压脉冲幅值很低, 在试探性操作过程中即使遇到永久性故障, 对电网的冲击也很小。

脉冲试探法需要根据故障选相结果对 AB 相间、BC 相间或 CA 相间进行试探性重合。

4) 载波试探法

载波试探法是产生一个低压高频载波信号, 经由升压变压器耦合到故障馈线上, 进行试探性操作, 并检测馈线的基波阻抗, 如果是瞬时性故障则基波阻抗较大, 如果是永久性故障则基波阻抗较小, 从而区分出永久故障和瞬时性故障。对于永久性故障不再重合断路器, 对于瞬时性故障则令断路器重合。

由于用于试探的载波功率较小, 在试探性操作过程中即使遇到永久性故障, 对电网的冲击也很小。

载波试探法可以三相同时进行, 只需一次试探性操作即可达到目的。

2 限流试探法^[23]

限流试探法有并联型和串联型两种典型结构,分别如图 1(a)和图 1(b)所示。图中, CB 为线路断路器, S 为辅助开关(可以为接触器), Z 为限流阻抗。

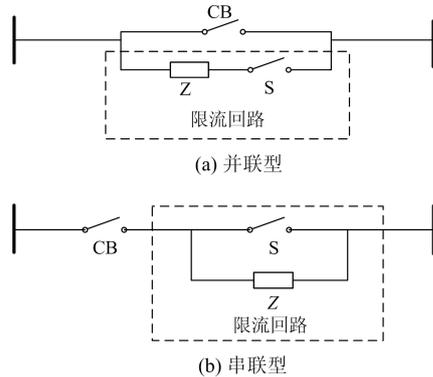


图 1 限流试探法典型结构

Fig. 1 Typical structure of current limiting trial method

并联型的 S 正常运行时处于断开状态,当 CB 跳闸后进行试探时, S 闭合投入 Z 进行试探,判断故障性质完成后 S 返回断开状态,若是瞬时性故障,则 CB 随后重合。

串联型的 S 正常运行时处于闭合状态,当 CB 跳闸后, S 也在失压后且无电流通过时断开,由 CB 重合投入 Z 进行试探,判断故障性质完成后 S 返回闭合状态,若是瞬时性故障,则 CB 随后重合。

并联型的优点在于除了限流试探工况以外, S 并不流过正常负荷电流;缺点在于在试探工况下,一旦在遇到永久性故障时, S 若出现分断障碍,有可能会造成故障无法切除,需要增加类似断路器失灵保护的策略来跳开上一级断路器。S 的其他障碍并无太大困扰,只需报警及时维修即可。比如:若 S 无法闭合仅仅会导致无法进行试探,若 S 在瞬时性故障时无法断开,则不影响 CB 重合。

串联型的优点在于即使 S 操作遇到障碍也不会造成太大困扰,只需报警及时维修即可。比如:若 S 无法断开顶多导致无法进行限流试探;若 S 在瞬时性故障时无法闭合,则可闭锁 CB 重合;若 S 在永久性故障时无法闭合,则不会有太大影响。串联型的缺点在于正常运行时 S 也流过负荷电流。

无论是串联型还是并联型结构, S 的选型必须确保可靠性,这一点通常不难做到。相比之下,串联型更加安全可靠,并且对已有断路器进行现场改造时更方便。

限流阻抗宜采用空心电抗器,将馈线短路电流限制到 3~5 倍额定载流量以内,即限流后的最大短

路电流在 2 000~3 000 A,瞬时性故障时馈线电压高于 0.7 p.u.,热设计条件按持续流过最大短路电流下时间不超过 1 min(并联型)/500 ms(串联型)考虑,实际尺寸大约为直径 20 cm、高度 30 cm 左右,实际测试温升小于 50 °C(并联型)/30 °C(串联型)。

3 电容放电试探法^[24]

电容放电试探法典型结构如图 2 所示。图中, CB 为线路断路器, R 和 C 分别为附加试探串联阻容结构的电阻和电容, S₁ 为取电回路开关(220 V),充电电路将 220 V 交流整流为直流向电容充电。切换开关组包含了 4 只低压分相操作开关,可以根据短路故障的选相结果,将共享的一组附加试探阻容结构投入到 AB、BC 和 CA 相间, S₂ 为高压三相投切换开关(10 kV, 可以是接触器)。

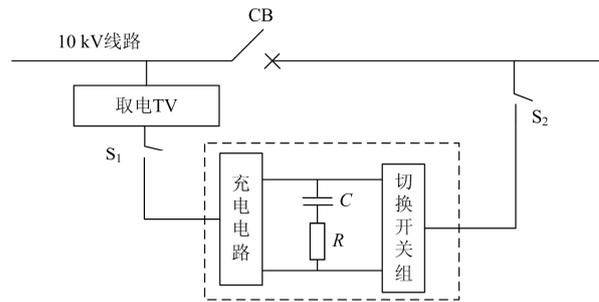


图 2 电容放电试探法典型结构

Fig. 2 Typical structure of capacitor discharge trial method

电容放电试探法下,电容放电回路可简化为一个 RLC 放电回路,当满足式(1)时,为非振荡衰减放电过程,此时容易根据放电电压和电流的瞬时值判断其衰减快慢,进而区分永久性故障和瞬时性故障。

$$R_e > 2\sqrt{L_e/C} \quad (1)$$

式(1)中, R_e 和 L_e 分别为 RLC 放电回路的等效电阻和等效电感。

永久性短路故障时,由于故障过渡电阻一般很小, R_e 近似为附加试探串联阻容结构的电阻 R , L_e 近似为故障点前馈线的电感;瞬时性故障时, R_e 近似为 R 与负荷等效电阻 R_L 的串联, L_e 近似为故障点前馈线的电感 L 与负荷等效电感 L_L 串联。考虑到负荷的功率因素一般高于 0.8,因此, R_L 的增加一般大于 L_L 的增加。也即,只要永久性故障时满足式(1),则瞬时性故障时也一定满足,因而,从确保回路非振荡放电特性的角度, R 和 C 参数设计时可只考虑永久性故障的情形。

R 和 C 的参数设计需综合考虑以下4个因素:

1) 在馈线上任何位置发生永久性故障时, 试探操作都满足式(1), 实际上只需馈线最末端(比如一般可以认为供电半径不超过10 km)满足, 则全线都能满足, 电缆馈线比架空馈线更容易满足。

2) 试探到永久性故障时, 电容的最大放电电流(U_C/R)限制到期望水平以下(比如: 小于100 A), U_C 为电容充电电压。

3) 试探到永久性故障时, 电容放电的时间常数合适, 太短则不利于检测, 太长则电容体积较大。这个方面与具体产品的采样速率和检测方法有关。

4) 能够可靠分辨出故障的性质, 可以根据极端场景进行设计, 瞬时性故障的最不利场景一般是最大负荷(比如: 达到馈线极限载流量)的情形, 永久性故障的极端场景一般是馈线末梢发生过渡电阻较高的相间短路故障的情形。

例如, 作者设计的一款装置, 为了充电方便起见, 采用交流 220 V 整流后对电容充电, 也即充电电压 U_C 额定值为 312 V。C 取 2 000 μ F, R 取 4 Ω , 放电电压阈值取 50 V, 检测试探操作中放电电压跌落至阈值的时间, 供电线路长度最长考虑 7 km(认为如果长度超过 7 km 就应分段配置保护并设置重合闸), 最不利情况下永久性故障电压跌落时间(最长)为 198 ms, 最不利情况下瞬时性故障电压跌落时间(最短)为 432 ms, 可见差异非常明显, 可以取它们的中位数 315 ms 作为判断阈值, 电压跌落时间超过 315 ms 的判断为瞬时性故障, 电压跌落时间短于 315 ms 的判断为永久性故障。

4 脉冲试探法^[25]

脉冲试探法的结构原理比较简单, 需将配电线路原有断路器替换为分相操作快速开关, 当配电线路发生短路故障引起分相快速开关跳闸, 经过一定的熄弧等待时间(通常大于 0.5 s)以后, 分相快速开关根据故障选相结果相应进行 AB、BC 或 CA 相间试探操作, 在接近线电压过零点前合闸, 并在极短时间完成分闸, 基于所产生的电压、电流脉冲特征识别线路阻抗, 判断故障性质。

脉冲试探法控制时序如图 3 所示, 为了限制脉冲试探电压和电流的幅值, 需确保合闸在电压 $u(t)$ 过零点 T_0 前 1/4 工频周期内的 T_2 时刻附近, 确保在电流 $i(t)$ 过零点 T_4 时刻能够完成分闸, 相应地需要根据开关合闸所需时间(ΔT_1)提前在 T_3 时刻发出合闸控制信号; 需要根据开关分闸所需时间(ΔT_2)提前在 T_5 时刻发出分闸控制信号, 考虑极端情形, 可按 $T_4=T_0$ 并考虑开关分闸动作时间离散度留有一定裕度来确定 T_5 时刻。

脉冲试探法的关键在于分相快速开关的分闸速度需足够快且分合闸离散度需足够小, 以确保时序控制的速度和精准度, 从而将脉冲试探时间宽度控制在较小范围内, 达到限制脉冲试探电压、电流的峰值不至于过大的控制目标。

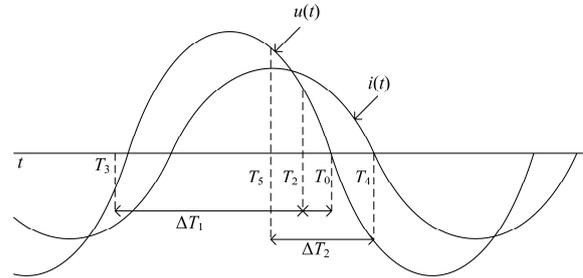


图 3 脉冲试探法控制时序

Fig. 3 Control sequence of pulse trial method

脉冲试探法下, 由于合闸时刻选择在接近电压过零点时, 因而下游线路所带配电变压器励磁涌流的影响很小, 只需综合考虑瞬时性和永久性故障的极端场景整定阻抗阈值即可。一般而言瞬时性故障的极端场景是最大负荷(比如: 达到馈线极限载流量)的情形, 永久性故障的极端场景是馈线段末梢发生过渡电阻较高的相间短路故障的情形, 阻抗阈值的整定只需确保在上述两种极端情形下有选择性即可。

考虑到脉冲试探过程持续时间较短, 基于电压、电流基波分量的阻抗计算方法难以实现, 因而只能采用基于暂态特征的阻抗参数识别原理, 例如基于时域微分方程的参数识别方法进行线路阻抗参数的识别。

5 载波试探法

载波试探法典型结构如图 4 所示, 图中 CB 为线路断路器, S_1 为取电回路开关(220 V), S_2 为高压三相投切开关(10 kV, 可以是接触器), 当配电线路发生故障引起 CB 跳闸以后, S_1 、 S_2 闭合, 载波试探信号发生回路投入工作, 通过取电 TV 从 CB 电

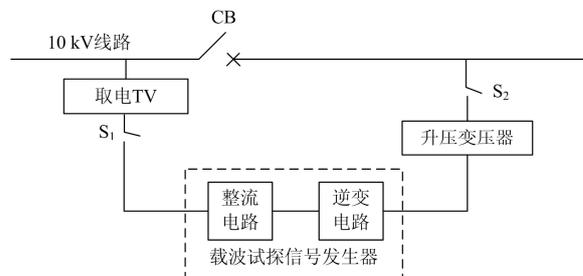


图 4 载波试探法典型结构

Fig. 4 Typical structure of carrier wave trial method

源侧取电,经整流再逆变后产生所需的特定频率的低压载波试探信号,经由升压变压器耦合到配电线路上,进行试探性操作。

一般而言,为了避免与配电系统中固有的传导干扰或者耦合干扰信号相混淆,载波试探信号的频率需选择在介于 N 与 $N+1$ 次谐波之间。同时考虑到若载波试探信号频率过高,则配电线路对地电容的影响将不可忽略,有可能对故障性质识别带来不利影响。通常架空线路对地电容较小,主要考虑电缆线路,以3 km 电缆线路的情形考虑,其工频对地容抗约为负荷阻抗的十倍到百倍级别,理想情况下,若载波试探信号频率升高10倍,则线路对地容抗和负荷感抗的比值将降低接近100倍,从而导致线路对地容抗的影响无法忽略,因而载波试探信号频率不宜高于10倍以上工频。基于上述两点,载波试探信号的频率可选择在100~500 Hz 范围内避开整数次谐波的频率。

通常取电TV额定容量一般不超过300 VA,对220 V 交流电采用二极管进行整流并经三相全桥逆变后输出的载波试探信号的线电压有效值不会超过220 V,逆变侧输出额定电流约为0.8 A。考虑到试探电压过高有可能加重线路故障程度,升压变压器的额定变比可选择为1.1 kV/0.22 kV(线电压),实际施加到配电线路相间的试探电压约为10%线路额定线电压,对应的施加到配电线路上的电流额定值约为160 mA。由于试探过程时间较短,通常不超过1 s,升压变压器的容量可以选择得比较小,按逆变器额定容量的1/10考虑,可取为30 VA。配置于柱上智能开关时,也可以直接利用柱上智能开关的线路侧电压互感器替换升压变压器。

载波试探法下对于故障性质的识别仍然可以基于瞬时性和永久性故障线路阻抗特征的差异来实现,但是需将试探信号频率下的线路阻抗参数折算到工频下,关于工频阻抗阈值的整定与本文第4节一致,不再赘述。

6 结论

1) 一二次配合的配电线路自适应重合闸的基本原理是试探法,具有不受配电线路自身结构和参数特点限制的优点,根据试探原理的不同,可以分为限流试探法、电容放电试探法、脉冲试探法和载波试探法四种技术路线。

2) 限流试探法有并联型和串联型两种典型结构。并联型的优点在于除了限流试探工况以外辅助开关并不流过正常负荷电流,缺点在于在试探工况下,若在永久性故障时辅助开关若出现分断障碍,

有可能导致故障无法切除;串联型的优点在于即使辅助开关操作遇到障碍也不会造成太大困扰,缺点在于正常运行时辅助开关也流过负荷电流。相比之下,串联型更加安全可靠。限流阻抗宜采用空心电抗器,阻抗值可以按限流后的最大短路电流在2 000~3 000 A,瞬时性故障时馈线电压高于0.7 p.u. 选取。

3) 电容放电试探法的关键在于附加试探串联阻容结构的电阻和电容参数的合理选取,需确保无论是瞬时性还是永久性故障时试探回路均呈现非振荡衰减的放电特性且最大放电电流限制在期望水平以下,同时回路的放电时间常数合适,能够可靠分辨故障性质。

4) 脉冲试探法的关键在于分相快速开关的分闸速度需足够快且分合闸离散度需足够小,以控制脉冲试探时间宽度,限制脉冲试探电压电流的峰值不至于过大。由于合闸时刻选择在接近电压过零点时,阻抗识别和故障性质判断不需要考虑配电变压器励磁涌流的影响。考虑到脉冲试探过程持续时间较短,需采用基于暂态特征的阻抗参数识别原理。

5) 载波试探法下,载波试探信号的频率需介于 N 与 $N+1$ 次谐波之间,并且为了减小线路对地电容的干扰,不宜高于10倍的工频频率;为了避免施加到配电线路上的试探电压过高而加重线路故障程度,升压变压器的变比不宜选择得过大,同时确保额定试探电流不至于过小而导致难以检测。

参考文献

- [1] 《中国电力百科全书》编辑委员会. 中国电力百科全书[M] // 水力发电卷. 北京: 中国电力出版社, 2001. Editorial Committee of China Electric Power Encyclopedia. China electric power encyclopedia[M] // Hydroelectric Generation Volume. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [2] 中国电力企业联合会. 2017 年全国电力可靠性年度报告[R]. 北京: 中国电力企业联合会, 2018. China Electricity Council. Annual report of national electric power reliability in 2017[R]. Beijing: China Electricity Council, 2018.
- [3] 黄越, 李凤婷, 易鹏, 等. 应用附加电容的柔性直流输电线路自适应重合闸策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 30-36. HUANG Yue, LI Fengting, YI Peng, et al. Adaptive reclosure scheme of MMC-HVDC transmission lines using additional capacitors[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 30-36.
- [4] 张悛宁, 方苏, 国建宝. 架空-海缆混合高压输电线路

- 自适应重合闸方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 115-121.
- ZHANG Yining, FANG Su, GUO Jianbao. Research on adaptive reclosing scheme for overhead-submarine hybrid high-voltage transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 115-121.
- [5] 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时故障和永久性故障的方法[J]. 西安交通大学学报, 1984, 18(2): 23-32.
- GE Yaozhong. Method of distinguishing between instant and permanent fault during automatic single-phase reclosing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1984, 18(2): 23-32.
- [6] 葛耀中, 索南加乐, 孔繁鹏, 等. 微机式自适应单相重合闸的判据和算法[J]. 继电器, 1995, 23(2): 7-9, 32.
- GE Yaozhong, SUONAN Jiale, KONG Fanpeng, et al. Criterion and algorithm of microcomputer-type adaptive single-phase reclosing[J]. Relay, 1995, 23(2): 7-9, 32.
- [7] GE Yaozhong, SUI Fenghai, XIAO Yuan. Prediction methods for preventing single-phase reclosing on permanent fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 114-121.
- [8] 宋国兵, 索南加乐, 孙丹丹. 输电线路永久性故障判别方法综述[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 75-80.
- SONG Guobing, SUONAN Jiale, SUN Dandan. A survey on methods to distinguish permanent faults from instantaneous faults in transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 75-80.
- [9] 梁振锋, 崔若巍, 杨宁宁, 等. 三相不对称输电线路单相自适应重合闸的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 31-36.
- LIANG Zhenfeng, CUI Ruwei, YANG Ningning, et al. Study on single-phase adaptive reclosure of the asymmetrical three-phase transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 31-36.
- [10] 石光, 邵文权, 郭耀珠, 等. 带并联电抗器输电线路单相故障性质识别判据[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 53-58.
- SHI Guang, SHAO Wenquan, GUO Yaozhu, et al. Identification criterion of permanent single-phase fault for transmission lines with shunt reactors[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 53-58.
- [11] 王庆庆, 王慧芳, 林达, 等. 基于并联电抗器差模电流波形特征的三相自适应重合闸永久性故障识别[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1127-1132.
- WANG Qingqing, WANG Huifang, LIN Da, et al. Identification of permanent faults for three-phase adaptive reclosure based on waveform characteristics of differential mode currents in shunt reactors[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1127-1132.
- [12] LIN Da, WANG Huifang, LIN Dongyang, et al. An adaptive reclosure scheme for parallel transmission lines with shunt reactors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(6): 2581-2589.
- [13] 成敬周, 张举. 基于电弧复小波检测的单相自适应重合闸[J]. 继电器, 2005, 33(7): 21-25, 49.
- CHENG Jingzhou, ZHANG Ju. Study of single-phase adaptive reclosure based on arc detection by complex wavelet algorithm[J]. Relay, 2005, 33(7): 21-25, 49.
- [14] 李斌, 李永丽, 曾治安, 等. 基于电压谐波信号分析的单相自适应重合闸[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 53-57.
- LI Bin, LI Yongli, ZENG Zhi'an, et al. Study on single-pole adaptive reclosure based on analysis of voltage harmonic signal[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 53-57.
- [15] BO Z Q, AGGARWAL R K, JOHNS A T, et al. New concept in transmission line reclosure using high-frequency fault transients[J]. IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 1997, 144(4): 351-356.
- [16] 范越, 施围. 在单相自动重合闸中检测电弧故障的新方法[J]. 继电器, 1999, 27(6): 5-7.
- FAN Yue, SHI Wei. A new method to detect arc fault in single-phase automatic reclosing[J]. Relay, 1999, 27(6): 5-7.
- [17] TERZIJA V V, RADOJEVIC Z M. Numerical algorithm for adaptive autoreclosure and protection of medium-voltage overhead lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 554-559.
- [18] 李永丽, 李斌, 黄强, 等. 基于高频保护通道信号的三相自适应重合闸方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 74-79.
- LI Yongli, LI Bin, HUANG Qiang, et al. The study on three-phase adaptive reclosure based on carrier channel and single transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 74-79.
- [19] 徐玉刚. 基于谐波阻抗测量技术的配电网三相自适应重合闸技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- XU Yugang. Research on three-phase adaptive reclosing in distribution network based on harmonic impedance measurement technique[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [20] 张志华, 乔红, 邵文权, 等. 配电网线路相间故障重合前无故障识别方法研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(2): 66-71.
- ZHANG Zhihua, QIAO Hong, SHAO Wenquan, et al. Non-fault detection in phase-to-phase faults before

- reclosing in distribution network[J]. Smart Power, 2018, 46(2): 66-71.
- [21] 朱珂, 宋玉涛, 徐玉刚, 等. 一种配电线路有源自适应重合闸技术研究[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 993-999.
ZHU Ke, SONG Yutao, XU Yugang, et al. An active adaptive reclosing scheme for distribution lines[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 993-999.
- [22] ZHU Ke, LÜ Rundong. A three-phase adaptive reclosure technology for distribution feeders based on parameter identification[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(6): 2173-2181.
- [23] 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安科技大学, 国家电网公司. 一种能够限制重合短路电流冲击的自适应重合闸装置及其控制方法: 中国, CN201811408536.1[P]. 2019-02-22.
State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an University of Science and Technology, State Grid Corporation of China. An adaptive reclosing device and its control method for restricting short circuit current impulse of reclosing: China, CN201811408536.1[P]. 2019-02-22.
- [24] 国家电网公司, 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 许继电气股份有限公司, 等. 一种利用电容器储能放电识别配电线路短路永久性故障与瞬时性故障的方法: 中国, CN201710802056.2[P]. 2017-12-15.
State Grid Corporation of China, State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xuji Electric Co., Ltd, et al. A method for identifying permanent and transient short circuit faults of distribution lines by energy storage discharge of capacitor: China, CN201710802056.2[P]. 2017-12-15.
- [25] 国家电网公司, 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 上海合凯电力保护设备有限公司. 智能自动重合闸装置: 中国, CN201710653469.9[P]. 2017-11-03.
State Grid Corporation of China, State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Shanghai Hekai electric power protection equipment Co., Ltd. Intelligent automatic reclosing device: China, CN201710653469.9[P]. 2017-11-03.

收稿日期: 2020-04-30; 修回日期: 2020-09-06

作者简介:

刘健(1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 百万人才工程国家级人选, 主要研究方向为配电网及其自动化技术; E-mail: powersys@263.net

张志华(1987—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为配电网及其自动化技术。E-mail: zzhtsky123@163.com

(编辑 葛艳娜)