

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201139

一种主动探测式的配电网相间重合前永久性故障判别方案

邵文权, 刘一璇, 关欣, 焦卓

(西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对配电线路相间故障后采用自动重合闸存在重合于永久故障的问题, 提出一种采用附加电容的主动探测式配电网相间重合前永久性故障判别方案。通过预充电的附加电容多次定时限投切到跳闸后相间回路, 利用三个相间回路放电电流衰减特性进行故障回路状态鉴别。任一回路放电电流衰减特性与其他回路放电电流衰减特性存在较大差异时, 则该相间回路存在故障。附加电容多次投切到该故障回路, 判别周期内放电电流衰减特性高度一致则认为是相间永久性故障。依据前述相间回路放电电流衰减特性的差异, 建立了永久故障识别判据及实现方案。PSCAD 的仿真验证表明, 所提方案能够在不同故障位置、不同过渡电阻情况下准确地识别线路相间永久故障, 有助于避免配电网相间故障重合闸动作的盲目性。

关键词: 配电网; 相间故障; 附加电容; 永久性故障; 自适应重合闸

An active detection scheme for permanent fault identification before phase-to-phase reclosing in a distribution network

SHAO Wenquan, LIU Yixuan, GUAN Xin, JIAO Zhuo

(School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Traditional auto-reclosing may reclose to the permanent fault after a phase-to-phase fault occurs in the distribution line. Thus an active detection scheme for identifying the permanent fault of a distribution network before phase-to-phase reclosing, with additional capacitance, is proposed. The pre-charged additional capacitor is switched to the phase to phase circuit after tripping for several times, and the fault circuit state is identified using the discharge current attenuation characteristics of three phase-to-phase circuits. When the discharge current attenuation characteristics of any circuit are significantly different from those of other circuits, there is a fault in the phase-to-phase circuit. If the discharge current attenuation characteristics of the circuit are highly consistent in the discrimination period, the phase-to-phase fault is considered as a permanent fault. According to the difference of discharge current attenuation characteristics between phase-to-phase circuits, a permanent fault identification criterion and its implementation scheme are established. The simulation results based on PSCAD show that the proposed scheme can accurately identify a permanent phase-to-phase fault in different fault locations and with different transition resistances. This is helpful in avoiding the blindness of reclosing action of a phase-to-phase fault in a distribution network.

This work is supported by the Key Research and Development Project of Shaanxi Province (No. 2020GY-167) and Xi'an Science and Technology Project (No. 2019-GXYD7.4).

Key words: distribution network; phase-to-phase fault; additional capacitance; permanent fault; adaptive reclosure

0 引言

现代配电网分布广泛, 因自然条件和人为因素发生的各类短路故障屡见不鲜, 其中尤以单相接地

短路故障最为频繁^[1], 相间短路故障次之。现有配电网通常在重要馈线出口处配置三相自动重合闸实现相间故障后的快速恢复供电, 但采用固定时限的重合闸存在盲目重合于永久故障, 对配电系统及设备带来了二次冲击的风险, 甚至可能会进一步恶化供电电能质量^[2-3]。因此, 为了更好地解决配电网相间故障后的盲目重合问题, 进行配电网相间重合前

基金项目: 陕西省重点研发计划资助(2020GY-167); 西安市科技计划项目资助(2019-GXYD7.4)

永久故障判别, 有助于提高配电网重合闸的自适应能力, 从而进一步提高配电系统的供电可靠性^[4-5]。

现有关于自适应重合闸永久故障判别的研究主要集中在高压输电线路^[6-17], 国内外学者提出了基于故障电弧阶段、故障恢复电压阶段的方法进行故障性质判别。而目前针对配电网永久故障性质判别的研究相对较少, 主要分为两类: 自身电气量法^[18-19]和外加注入信号法^[20-22]。1) 自身电气量法^[18-19]是利用跳闸后短时的储能信息求判别故障性质, 如结合电容放电的衰减特性^[18]、网络参数识别^[19]。这类方法受并联电容器储能大小及放电时间等因素影响较大。2) 外加注入信号法^[20-22]是依靠外加电力电子注入装置在配电变压器低压侧注入可靠的逆变信号, 检测断路器出口处的暂态电流、电压频谱特征进行故障状态的检测。该方法需要配电变压器高压侧与低压侧之间的通信配合以及较为复杂的控制系统。

现有学者针对高压线路重合前故障识别问题, 构造了一种利用线路侧配置的附加电容的放电特征判断故障状态以实现自适应重合闸的方案^[23], 该方案中人为注入的信号保证了信号的可靠性, 电路相对简单, 具有较好的实现性, 为配电网相间永久故障检测提供了一种思路。本文通过在配电网线路侧三相跳闸后接入预充电的附加电容, 利用附加电容在不同相间回路的放电电流特性以及单一回路多次放电电流特性实现相间永久故障的识别, 最后仿真验证了所提方案的正确性与有效性。

1 主动探测式方案及故障特征分析

1.1 主动探测式方案

以图 1 所示的采用附加电容的配电线路为例说明本文所研究的主动探测式配电网相间重合前永久故障判别的工作原理。本方案在配电网线路侧配备了三相接地开关 K_d , 在线路侧首端设置了由直流源 DC 预充电的附加电容 C 以及相应的直流源开关 K_b 与附加电容开关 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 。附加电容控制策略如表 1 所示。

当配电线路发生相间故障三相跳闸后, 采用以下步骤实施主动探测式方案。

Step 1: 接入三相接地开关, 将线路残余电量释放后退出, 以此避免对判定结果的影响, 接入时长设为 0.1 s。

Step 2: 利用预充电的附加电容分别进行 AB 相、BC 相、CA 相三个相间回路定时限放电, 比较多次采集到的电容电流信息判别故障状态。

Step 3: 对故障相间多次投切充电附加电容,

根据电容电流信息进一步判别故障性质。

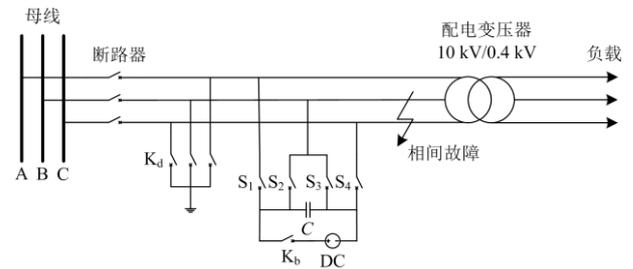


图 1 采用附加电容的配电线路

Fig. 1 Distribution line with additional capacitance

表 1 附加电容控制策略

Table 1 Additional capacitance control strategy

检测相	控制策略
AB 相	S_1 、 S_3 闭合, 其余开关断开
BC 相	S_2 、 S_4 闭合, 其余开关断开
CA 相	S_1 、 S_4 闭合, 其余开关断开

1.2 故障特征分析

1.2.1 故障相间等值网络

以线路发生 BC 相间故障为例, 分析故障回路投入附加电容后电容电流的变化规律。图 2 为故障相间等值网络。附加电容 C 两端电压为 u_c , 其初始值为 U_0 ; i_c 为 C 的放电电流; R_L 、 L_L 为线路自电阻和自电感; m 为故障点到线路首端的距离占线路全长的比值; R_f 为故障过渡电阻, R_T 、 L_T 为配电降压变压器的等值电阻与等值电感。

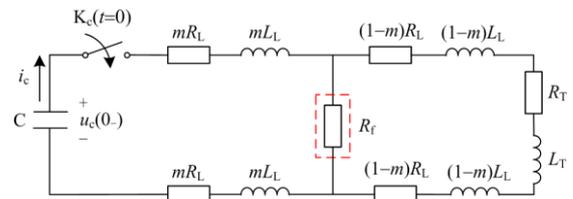


图 2 故障相间等值网络

Fig. 2 Equivalent network of fault phase-to-phase circuit

图 2 可简化为图 3 所示的 RLC 等效电路。

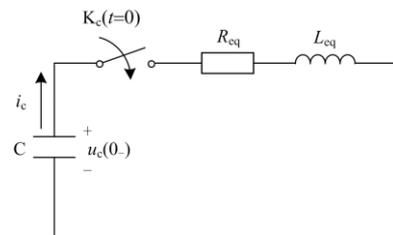


图 3 等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit

R_{eq} 、 L_{eq} 为电容放电回路等效电阻和等效电感。从二阶零输入响应入手, 设电容开关在 $t=0$ 时刻闭合, 根据基尔霍夫电压定律, 将有如下关系成立:

$$\begin{cases} L_{eq} \frac{di_c}{dt} + R_{eq} i_c + \frac{1}{C} \int i_c dt = 0 \\ i_c(0+) = i_c(0-) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

由电路分析可得:

$$\tau = \frac{2L_{eq}}{R_{eq}} \quad (2)$$

式中, τ 为衰减时间常数, 反映了放电电流衰减速度。

1) 当 $R_{eq} < 2\sqrt{L_{eq}/C}$ 时, 电路为欠阻尼振荡状态, 电容放电电流为

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = \frac{U_0}{\omega_1 L_{eq}} e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega_1 t) \\ \omega_1^2 = \frac{1}{L_{eq} C} - \left(\frac{R_{eq}}{2L_{eq}}\right)^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中, ω_1 为固有振荡角频率。此时 $i_{c1}(t)$ 是振幅按指数规律衰减的正弦函数。因衰减因子 $e^{-\frac{t}{\tau}}$ 的存在, 有如下关系成立:

$$i_{c1_max} < \frac{U_0}{\omega_1 L_{eq}} \quad (4)$$

电容放电初始阶段, $i_{c1}(t)$ 迅速达到了最大值。

2) 当 $R_{eq} > 2\sqrt{L_{eq}/C}$ 时, 电路为过阻尼非振荡状态, 电容放电电流为

$$\begin{cases} i_{c2}(t) = -\frac{U_0}{L_{eq}(p_2 - p_1)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \\ p_1 = -\frac{R_{eq}}{2L_{eq}} + \sqrt{\left(\frac{R_{eq}}{2L_{eq}}\right)^2 - \frac{1}{L_{eq} C}} \\ p_2 = -\frac{R_{eq}}{2L_{eq}} - \sqrt{\left(\frac{R_{eq}}{2L_{eq}}\right)^2 - \frac{1}{L_{eq} C}} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知, $0 > p_1 > p_2$, $i_{c2}(t)$ 同样是由 0 快速上升至最大值 i_{c2_max} , 再逐渐衰减至 0, 并有如下关系成立:

$$i_{c2_max} < -\frac{U_0}{p_2 L_{eq}} \quad (6)$$

3) 当 $R_{eq} = 2\sqrt{L_{eq}/C}$ 时, 电路为临界阻尼非振荡状态, 电容放电电流为

$$i_{c3}(t) = \frac{U_0}{L_{eq}} t e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7)$$

由式(7)可知, $i_{c3}(t)$ 由 0 快速上升至最大值 i_{c3_max} , 再逐渐衰减至 0, 并有如下关系成立:

$$i_{c3_max} = \frac{\tau U_0}{e L_{eq}} \quad (8)$$

综上, 根据 R_{eq} 、 L_{eq} 、 C 取值的不同, 电路暂态过程会呈现三种不同的放电状态。线路三相跳闸, 故障消失前接入附加电容 C , 产生放电电流 i_c , 并逐渐衰减至 0。对于永久故障而言, 无论处于何种放电状态, 在多次投切附加电容放电的过程中, 回路结构始终无变化, 即衰减时间常数 τ 不变, 因此多次放电电流的衰减特性存在高度的一致性。

1.2.2 非故障相间等值网络

以非故障相 AB、CA 为例, 非故障相间等值网络如图 4 所示。

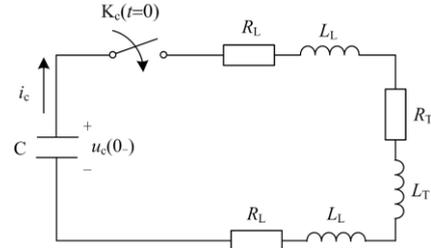


图 4 非故障相间等值网络

Fig. 4 Equivalent network of non-fault phase-to-phase circuit

由零输入响应分析可得:

$$\begin{cases} (2L_L + L_T) \frac{di_c}{dt} + (2R_L + R_T) i_c + \frac{1}{C} \int i_c dt = 0 \\ i_c(0+) = i_c(0-) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

由电路分析可得:

$$\tau' = \frac{2(2L_L + L_T)}{2R_L + R_T} \quad (10)$$

非故障相间回路结构与故障相间回路结构存在明显差异, 非故障相间的衰减时间常数 τ' 与放电回路的固有参数有关, 其明显区别于故障相间的衰减时间常数 τ 。

通过上文分析可知, 当附加电容在故障相间回路进行放电时, 其放电电流衰减特性与另外两个非故障相间回路放电特性有较显著差异, 本文基于不同相间回路放电特性差异进行相间故障状态识别, 再通过故障回路多次放电特性判别相间故障性质。

2 判据构建与实现方案

2.1 相间永久故障判据构建

多次投切充电附加电容, 检测其放电电流, 因故障相间与非故障相间的放电回路存在明显差异,

导致电容电流衰减特性呈现两种不同衰减趋势, 其衰减形式取决于回路中等效电阻与等效电感之间的大小关系。图 5 给出了电容放电电流波形, 为了更好地表征附加电容多次投切期间放电电流衰减特性, 引入前两次放电电流正峰值变化率特征反映衰减特性, 如式(11)所示。

$$k_{j,n} = \frac{i(t_{j,n,2p}) - i(t_{j,n,1p})}{t_{j,n,2p} - t_{j,n,1p}} \quad (11)$$

式中: $k_{j,n}$ 表示第 n 次投入电容时第二个正峰值与第一个正峰值间电流平均变化率; j 表示相间回路, 分别为 AB、BC、CA; $t_{j,n,2p}$ 、 $t_{j,n,1p}$ 分别表示第 n 次投入电容时第二个正峰值与第一个正峰值对应的时间点; $i(t_{j,n,2p})$ 、 $i(t_{j,n,1p})$ 分别表示第 n 次投入电容时第二个正峰值与第一个正峰值对应的电流值。

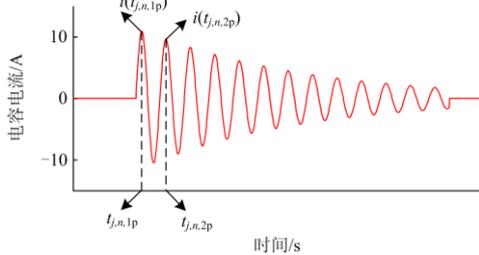


图 5 电容放电电流波形

Fig. 5 Discharge current waveform of capacitance

依次向 AB、BC、CA 三个相间回路投入充电附加电容, 考虑到相间故障跳闸后接入接地开关有利于加速电弧的熄灭, 可能存在短时的瞬时性故障在附加电容首次投入前故障就已消失的情况, 此时三个回路的电容放电电流衰减特性具有高度相似性。根据式(11)分别计算电流平均变化率, 以投入 AB 相求得的 $k_{AB,n}$ 为基准值, 多次轮换投切, 利用波形相似特征构造无故障判据 I。

无故障判据 I:

$$\left| \frac{k_{BC,n} - k_{AB,n}}{k_{AB,n}} \right| \leq \lambda (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (12)$$

$$\left| \frac{k_{CA,n} - k_{AB,n}}{k_{AB,n}} \right| \leq \lambda (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (13)$$

若某一回路与其余两回路的电流衰减特性有显著差异, 说明此回路存在故障, 可针对该故障回路构建永久故障判据 II, 进一步可靠确认故障性质。

永久故障判据 II:

$$\left| \frac{k_{j,n} - k_{j,1}}{k_{j,1}} \right| \leq \delta (n = 2, 3, 4, \dots) \quad (14)$$

式中, λ 、 δ 分别为判据 I、判据 II 的整定门槛。判据 I、II 越接近 0, 表明两波形越相似。由于存在模型简化误差与计算误差, 在进行永久故障判别时, 判据需留有一定裕量, 结合仿真分析建议 λ 取 0.1~0.2、 δ 取 0.3~0.5。

设附加电容充电时间为 0.1 s, 反复多次投入电容, 每次电容进行判定的时间为 0.1 s, 一旦附加电容投入期间, 式(12)与式(13)同时成立, 则直接判定故障在附加电容投入之前已消失; 否则, 故障依然存在, 此时需对故障回路的故障性质进一步判别。若式(14)成立并且达到最大允许判别时间, 则判为永久性故障; 若不成立, 则判为瞬时性故障。

2.2 实现方案

根据上述分析, 可制定如下的配电网相间永久故障判别实现方案, 其流程图如图 6 所示。

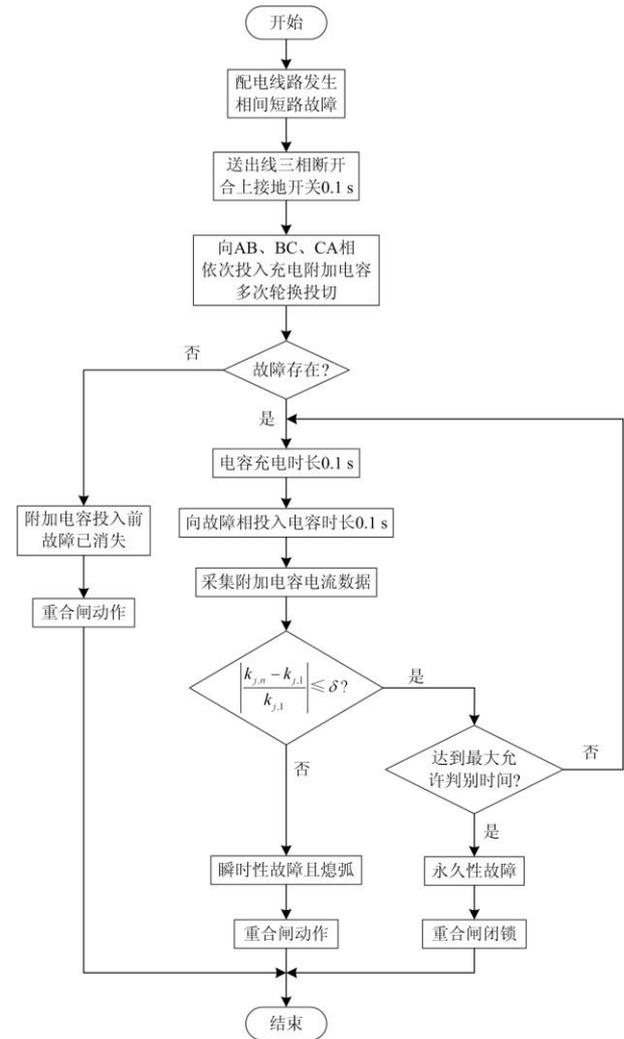


图 6 永久故障判别实现方案

Fig. 6 Realization scheme of permanent fault identification

1) 配电线路故障跳闸, 为避免线路残余电量影响判定结果, 跳闸后经固定延时, 接入接地开关, 接入时长设为 0.1 s。

2) 向 AB、BC、CA 相间依次投入充电附加电容, 采集其放电电流数据, 分别计算电流平均变化率 $k_{j,1}$ 。若同时满足式(12)与式(13), 则判定故障在附加电容投入前就已消失, 此时切除附加电容, 重合闸动作; 否则, 判定故障依然存在, 进行步骤 3)。

3) 若满足式(12), 不满足式(13), 则判定 CA 相故障; 若满足式(13), 不满足式(12), 则判定 BC 相故障; 若均不满足式(12)与式(13), 则判定 AB 相故障。确定故障回路后, 进行步骤 4)。

4) 对故障回路多次投切附加电容, 检测其电流并计算 $k_{j,n}$ 。若式(14)成立并且达到当地配电线路重合闸最大允许判别时间, 则判为永久性故障, 重合闸闭锁; 若不成立, 判为瞬时性故障, 重合闸动作。若未达到最大允许判别时间, 进行步骤 5)。

5) 切除线路附加电容, 经固定延时(该延期内, 接入直流源对电容重新充电后再切除直流源), 返回步骤 4), 进行循环判定。

3 仿真实验

3.1 PSCAD 仿真建模

本文基于 PSCAD 仿真软件建立如图 7 所示的 10 kV 配电网系统模型。线路 L_1 、 L_6 为架空线路, 线路 L_2 、 L_5 为电缆线路, 线路 L_3 、 L_4 为电缆-架空混合线路; 直流电压源幅值为 3 kV, 附加电容为 20 μF 。配电线路单位长度参数如表 2 所示。

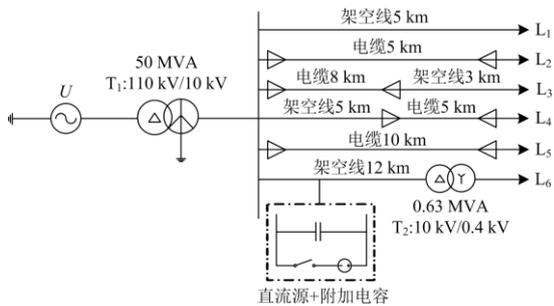


图 7 10 kV 配电网系统

Fig. 7 10 kV distribution network system

表 2 配电线路参数

Table 2 Parameters of the distribution line

线路类型	相序	电阻/ (Ω/km)	电感/ (mH/km)	电容/ ($\mu\text{F}/\text{km}$)
架空线路	正序	0.125	1.299	0.040
	零序	0.275	4.586	0.012
电缆线路	正序	0.270	0.254	0.339
	零序	2.700	1.019	0.280

3.2 仿真计算

以线路 L_6 中点发生经 $R_f = 10 \Omega$ 的 BC 相间故障为例, 通过向 AB、BC、CA 三个相间轮换投切充电附加电容判别故障状态, 从而进一步判别故障性质。仿真总时长为 0.7 s, 0.2 s 时故障发生, 0.22 s 时断路器跳闸, 迅速接入接地开关, 接入时长为 0.1 s; 瞬时性故障持续时间为 0.3 s 时, 永久性故障持续至仿真结束; 0.34 s 时首次投入附加电容, 0.54 s 时第二次投入附加电容, 两次投入时长均为 0.1 s。仿真结果如图 8 和图 9 所示。

根据图 8 和图 9 仿真结果可知, 当配电线路发生相间故障, 在故障跳闸后向 AB、BC、CA 相间轮换投切附加电容, 故障相间回路放电电流衰减特性与其他两个相间回路放电电流衰减特性存在显著差异。对于故障相间回路: 若故障持续存在, 电容会向线路产生持续的放电现象, 且在多次投入期间

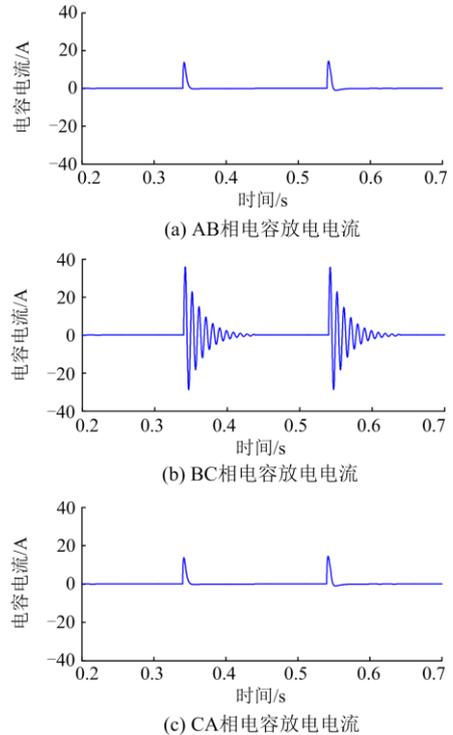
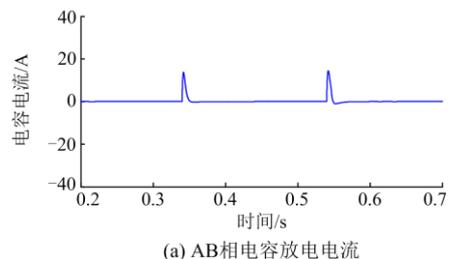


图 8 BC 相间永久性故障时电容放电电流

Fig. 8 Capacitance discharge current when a permanent fault occurs between B-phase and C-phase



(a) AB 相电容放电电流

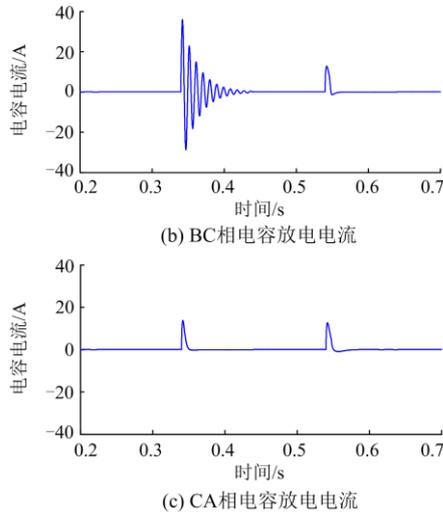


图9 BC相间瞬时性故障时电容放电电流

Fig. 9 Capacitance discharge current when a transient fault occurs between B-phase and C-phase

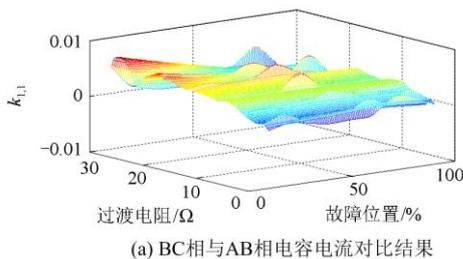
电容电流衰减特性存在高度的一致性；若瞬时性故障消失，则附加电容的放电电流迅速衰减至 0，其与永久性故障的电流衰减特性差异显著且易辨识。

为了验证所提判据的正确性及适用性，进行了配电网架空线路不同故障情况下大量的仿真计算。考虑到存在附加电容投入前故障已消失的情况，利用无故障判据 I 先进行不同相间故障状态的判别，其整定门槛 λ 取 0.1，仿真结果如图 10 和图 11 所示；确定故障回路后，利用永久故障判据 II 进一步判别故障性质，其整定门槛 δ 取 0.5，仿真结果如图 12 和图 13 所示。为了便于仿真分析，进行如下定义：

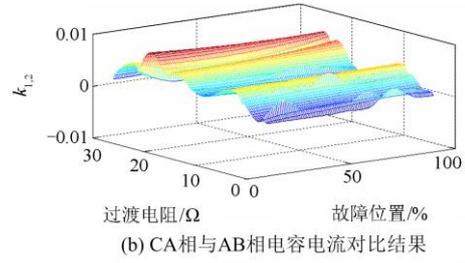
$$k_{1,1} = (k_{BC,n} - k_{AB,n}) / k_{AB,n}, \quad k_{1,2} = (k_{CA,n} - k_{AB,n}) / k_{AB,n};$$

$$k_2 = (k_{BC,n} - k_{BC,1}) / k_{BC,1}.$$

根据图 10 和图 11 的仿真结果可知，依次向 AB、BC、CA 三个相间回路投切充电附加电容：当故障在附加电容投入前已消失，此时三个回路电流衰减特性具有高度一致性，即 $k_{1,1}$ 与 $k_{1,2}$ 都位于 $[-\lambda, \lambda]$ ，满足判据 I；若故障存在，则故障回路与另两个非故障回路电流衰减特性存在显著差异，即与故障相相关的仿真计算结果位于 $[-\lambda, \lambda]$ 之外，不满足判据 I。

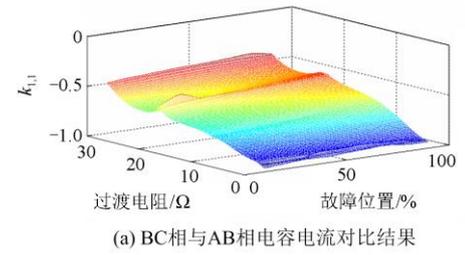


(a) BC相与AB相电容电流对比结果

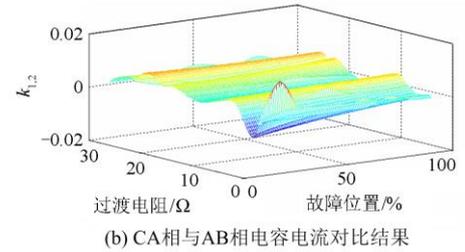


(b) CA相与AB相电容电流对比结果

图 10 附加电容投入前故障已消失的仿真计算结果
Fig. 10 Simulation results of fault disappears before additional capacitor input



(a) BC相与AB相电容电流对比结果



(b) CA相与AB相电容电流对比结果

图 11 BC 相间故障存在的仿真计算结果
Fig. 11 Simulation results of phase B-to-C fault exists

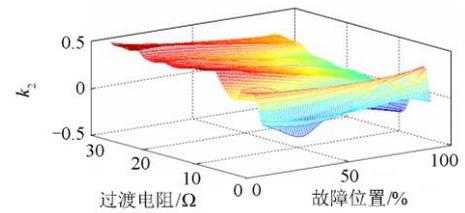


图 12 相间永久性故障时的仿真计算结果

Fig. 12 Simulation results of phase-to-phase permanent fault

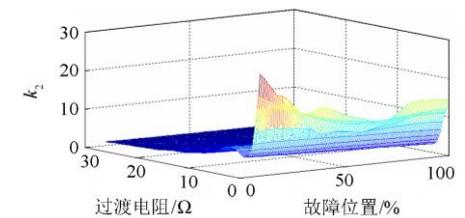


图 13 相间瞬时性故障时的仿真计算结果

Fig. 13 Simulation results of phase-to-phase transient fault

由图 12 和图 13 的仿真结果可知, 附加电容投入故障相间进行多次放电期间: 永久性故障时电流衰减特性存在高度一致性, k_2 位于 $[-\delta, \delta]$, 满足判据 II; 瞬时性故障消失前后的电容电流衰减特性存在较大差异, k_2 在整定值 δ 以上的较大范围内波动。即使发生过渡电阻高达 30Ω 的相间永久性故障时, k_2 的计算值也位于 $[-\delta, \delta]$, 利用所提永久故障判据 II 能够可靠识别永久性故障, 且不受故障位置与过渡电阻的影响。

为进一步验证本文所提判据的适用性, 进行了配电网两相接地故障的仿真计算, 仿真结果如图 14 和图 15 所示。

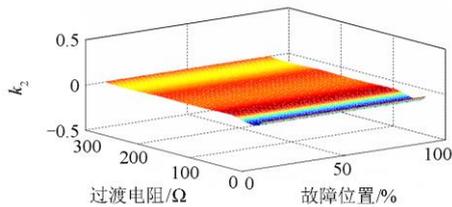


图 14 两相接地永久性故障时的仿真计算结果

Fig. 14 Simulation results of two-phase-to-ground permanent fault

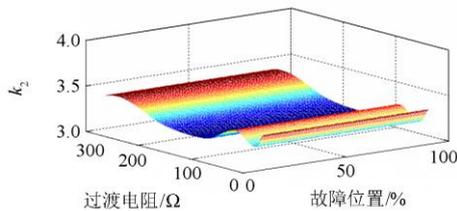


图 15 两相接地瞬时性故障时的仿真计算结果

Fig. 15 Simulation results of two-phase-to-ground transient fault

由图 14 和图 15 的仿真结果可知, 永久性故障时 k_2 位于 $[-\delta, \delta]$, 基本不受过渡电阻的影响, 即使在经 300Ω 过渡电阻时依旧满足判据 II, 可靠判为永久性故障; 瞬时性故障, k_2 在整定门槛 δ 以上范围内波动。因此, 利用所提永久故障判据 II 依然能够可靠识别两相接地永久性故障, 充分验证了所提方法的正确性及适用性。

需要指出的是, 本文所提的方法存在将三相故障误判为无故障的风险。考虑三相故障的发生概率低, 为了降低三相故障盲目重合的风险, 需要结合跳闸前三相母线电压的信息确认为三相故障, 在所提判据 I 判为无故障的同时, 结合现场运维信息进一步确认三相故障是否消失, 若排除为三相永久故障则相间重合闸。

4 结论

本文提出了一种基于附加电容的主动探测式配电网永久故障判别方案, 该方案具有以下特点:

1) 充分利用预充电的附加电容跳闸后的储能放电特性, 通过电容多次定时限充放电, 避免了配电网线路相间故障跳闸后因电气量衰减速度过快导致缺少可利用有效电气信息的影响, 为实现配电网相间重合前永久性故障判别提供了一种新思路。

2) 附加电容在故障线路中的放电电流波形较为直观, 具有较低的识别难度, 大量仿真验证了所提判据判断结果的正确性, 对于故障性质的判定灵敏度较高。

3) 所提方案需要增加附加电容、直流电源及相应的配套开关, 对于一些非常重要的配电网线路, 为了提高供电可靠性, 具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] 刘健, 张志华, 吴水兰, 等. 一二次配合的配电网故障处理[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 1-6.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, WU Shuilan, et al. Fault processing with coordination of primary equipments and secondary devices[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 1-6.
- [2] 朱珂, 李德强, 妥建军, 等. 主动扰动技术在停电配电网线路相间故障检测中的应用[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 191-196.
ZHU Ke, LI Deqiang, TUO Jianjun, et al. Application of active disturbance technology in detecting interphase fault of de-energized distribution lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 191-196.
- [3] 沈军, 舒治淮, 陈军, 等. 自适应重合闸在电力系统中的应用实践[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 152-156.
SHEN Jun, SHU Zhihuai, CHEN Jun, et al. Application of adaptive auto-reclosure in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 152-156.
- [4] 刘健, 张志华, 张小庆. 配电网故障处理若干问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 1-6.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing. Investigation on fault processing for electric power distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 1-6.
- [5] 张维, 宋国兵, 豆敏娜, 等. 基于自适应重合闸的配电网快速故障定位与隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 60-67.
ZHANG Wei, SONG Guobing, DOU Minna, et al. A quick fault location and isolation method in distribution network based on adaptive reclosure[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 60-67.
- [6] RADOJEVIC Z M, SHIN J R. New one terminal digital algorithm for adaptive reclosing and fault distance

- calculation on transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1231-1237.
- [7] LUO Xunhua, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. Adaptive single-phase reclosure scheme for transmission lines with shunt reactors based on current inner product[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(7): 1770-1776.
- [8] RADOJEVIC Z M, SHIN J R. New digital algorithm for adaptive reclosing based on the calculation of the faulted phase voltage total harmonic distortion factor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 37-41.
- [9] 邵文权, 刘朋跃, 王斌, 等. 基于等值阻抗相位特征的带并补电抗线路单相自适应重合闸故障识别方法[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1796-1805.
- SHAO Wenquan, LIU Pengyue, WANG Bin, et al. Single-phase adaptive reclosure fault identification for transmission lines with shunt reactors based on equivalent impedance phase property[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1796-1805.
- [10] HUANG Xinghua, SONG Guobing, WANG Ting, et al. Three-phase adaptive reclosure for transmission lines with shunt reactors using mode current oscillation frequencies[J]. The Journal of Engineering, 2018(15): 1012-1017.
- [11] XIE Chao, LI Fengting. Adaptive comprehensive auto-reclosing scheme for shunt reactor-compensated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5): 2149-2158.
- [12] SAHOO B, SAMANTARAY S R. Fast adaptive autoreclosing technique for series compensated transmission lines[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(15): 3272-3280.
- [13] LUO Xunhua, HUANG Chun, JIANG Yaqun. Improved digital algorithm for adaptive reclosing for transmission lines with shunt reactors[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(9): 2066-2070.
- [14] 邵文权, 张望妮, 夏经德, 等. 基于模型识别的带并补电抗输电线路三相重合闸无故障识别[J]. 高电压技术, 2016, 42(5): 1630-1635.
- SHAO Wenquan, ZHANG Wangni, XIA Jingde, et al. Model-recognition-based non-fault detection scheme for three-phase reclosure on reactored transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(5): 1630-1635.
- [15] NING Jiaying, HE Baina, WANG Zhenzhen, et al. Algorithm for adaptive single-phase reclosure on shunt-reactor compensated extra high voltage transmission lines considering beat frequency oscillation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(13): 3193-3200.
- [16] ZHALEFAR F, ZADEH M R D, SIDHU T S. A high-speed adaptive single-phase reclosing technique based on local voltage phasors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 32(3): 1203-1211.
- [17] 颀雅迪, 何柏娜, 孟涛, 等. 特高压高补偿度串补线路潜供电弧特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 78-86.
- XIE Yadi, HE Baina, MENG Tao, et al. Research on secondary arc characteristics of UHV lines with high compensation degree series compensation[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 78-86.
- [18] 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.
- [19] 李育强, 宋国兵, 王维庆, 等. 基于参数识别光伏接入配网永久性故障判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 1-7.
- LI Yuqiang, SONG Guobing, WANG Weiqing, et al. Permanent fault identification method based on parameter identification for photovoltaic access to distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 1-7.
- [20] 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.
- [21] 丁芑, 朱珂, 朱裕庆, 等. 基于模型辨识的配电线路永久性故障判定方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1004-1012.
- DING Peng, ZHU Ke, ZHU Yuqing, et al. Determining the permanent fault in distribution lines based on model recognition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1004-1012.
- [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] 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.

收稿日期: 2020-09-16; 修回日期: 2020-10-29

作者简介:

邵文权(1978—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: shaowenquan@xpu.edu.cn

刘一璇(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 553490809@qq.com

(编辑 姜新丽)