

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210209

带并联电抗器同杆双回输电线路跨线接地故障 自适应重合闸策略

周伟绩^{1,2}, 李凤婷¹, 解超¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 石河子大学机械电气工程学院, 新疆 石河子 832000)

摘要: 针对传统重合闸策略不判定故障性质而盲目重合、重合失败对系统造成二次冲击的问题, 提出了基于故障相无功功率的带并联电抗器同杆双回输电线路跨线接地故障自适应重合闸策略。首先, 提出了准两相跳闸策略, 为跨线接地故障中故障相提供充足耦合电气量。其次, 基于故障相在瞬时性故障和永久性故障中无功功率的巨大差异, 提出了基于无功功率的跨线接地故障熄弧判据。再次, 基于跨线接地故障熄弧判据, 提出了跨线接地故障重合策略, 进而提出了带并联电抗器同杆双回输电线路跨线接地故障自适应重合闸策略。最后, 基于PSCAD/EMTDC, 验证了所提出自适应重合闸策略的正确性和可靠性。

关键词: 带并联电抗器同杆双回输电线路; 跨线接地故障; 自适应重合闸; 无功功率; 熄弧

Adaptive autoreclosing scheme for line-to-line grounded faults on double-circuit transmission lines with shunt reactors

ZHOU Weiji^{1,2}, LI Fengting¹, XIE Chao¹

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: There is a problem that traditional reclosing strategy blindly recloses without discriminating the nature of the fault, and the failure of reclosing will result in a secondary impact on the system. Thus an adaptive autoreclosing strategy based on the reactive power of the fault phase for double-circuit transmission lines with a shunt reactor is proposed. First, a quasi two-phase tripping strategy is proposed to provide sufficient coupling electric quantity for the fault phase in the line-to-line grounded faults. Secondly, based on the huge difference of reactive power between the transient and permanent faults, a line-to-line grounded faults arc extinguishing criterion based on reactive power is proposed. Thirdly, based on this criterion, the reclosing strategy is proposed. An adaptive reclosure strategy for the line-to-line grounded faults of double-circuit transmission lines with shunt reactors is proposed. Finally, the correctness and reliability of the proposed adaptive reclosure strategy are verified based on PSCAD/EMTDC.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877185).

Key words: double-circuit transmission lines with shunt reactors; line-to-line grounded faults; adaptive autoreclosing; reactive power; arc extinguishing

0 引言

同杆双回输电线路在拥有低成本、节省输电通道等优点的同时, 也存在着故障种类繁多, 自动重

合闸逻辑制定困难的问题^[1-4]。若采用定时限重合, 不检故障熄弧的传统重合闸思路, 一旦重合失败, 相比单回输电线路, 同杆双回输电线路造成的影响范围更大, 危害更加严重^[5-6]。因此, 提出一种能够应对同杆双回输电线路各种故障类型, 且在故障线路重合前快速准确检定故障熄弧的自适应重合闸策略十分必要。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877185); 石河子大学科研计划项目资助(ZZZC201736B)

近年来, 专家学者针对同杆双回输电线路的自适应重合闸做了若干研究, 这些研究基本与单回输电线路三相重合闸的思路一致。若同杆双回输电线路采用传统的跳闸方法, 跨线故障时, 两回线路大概率会被全部跳开, 线路中的残余电气量有可能迅速衰减, 不利于故障熄弧判定。针对此问题, 文献[7]提出了分相重合的思路, 通过逐相尝试重合, 避免所有相同时重合时两回线同时受到二次冲击。然而, 这种机会主义的重合方法并未在重合前检定故障熄弧, 仍然有可能使线路重合至故障状态, 从而导致重合失败。相应地, 文献[8]采用逆向思维, 利用快速接地开关释放同杆双回输电线路中的残余能量, 以加速电弧性故障的熄灭, 提高重合成功率。然而, 当故障为永久性时, 该方法便无法奏效了。对于带并补的同杆双回输电线路, 即使两回线路全部跳开, 线路中的残余电气量依旧能够维持残余电气量振荡约 1 s 的时间; 若采用准三相跳闸策略, 这一时长有可能更长。基于此, 文献[9-12]和文献[13-14]分别提出了基于故障相电压幅值与自由振荡分量的故障熄弧判据, 文献[15-16]提出基于故障相电气量智能算法的故障熄弧判定方法。然而, 对于自然熄弧的情况, 故障相电压幅值在故障熄弧前后的变化程度不够明显; 对于新能源高渗透地区^[17-18], 线路故障期间有可能会因为风电场低电压穿越及高比例的电力电子设备, 使同杆双回输电线路健全相中出现次同步分量, 影响基于自由分量故障熄弧判定的准确性。

本文针对同杆双回输电线路跨线接地故障展开自适应重合闸策略研究。首先, 提出一种在同杆双回输电线路发生跨线接地故障时, 能够获得充足耦合电气量的准两相跳闸策略; 其次, 通过对不同故障相并联电抗器故障熄弧前后放电特性的分析, 提出一种基于故障相无功功率特性的熄弧判据; 再次, 基于所提熄弧判据, 提出适用于同杆双回输电线路的新型合闸策略; 最后, 提出一种基于无功低频分量的适用于带并联电抗器同杆双回输电线路跨线接地故障的自适应重合闸策略, 通过 PSCAD/EMTDC 仿真实验验证该重合闸策略的正确性和可行性。

1 准两相跳闸策略

带并联电抗器同杆双回输电线路发生跨线接地故障后, 两回线路六相并未全部跳闸, 某一接地相的等效电路图如图 1 所示。同杆双回输电线路并联电抗器经过共同中性点小电抗接地, 因而其相间电抗为直接相连的关系, 电气量能够在两回输电线路之间直接联系, 所以, 如图 1 所示, 异回健全相对

故障相的耦合作用可等效为同回健全相对故障相的耦合作用。

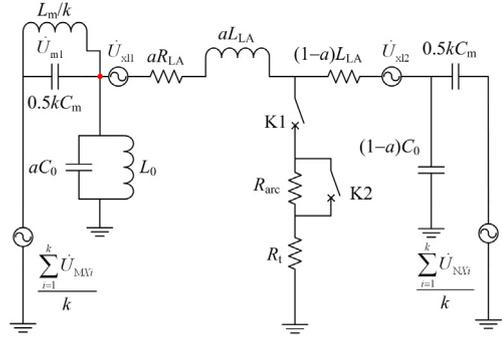


图 1 某一故障相的等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of a fault phase

图 1 中: \dot{U}_{MXi} 、 \dot{U}_{NXi} 为健全相 M 端、N 端电压, X 可代表任意回的任意相, i 为健全相数, 显然, 健全相数量 i 不可能为零; L_0 、 L_m 分别为并补电抗由星型变换为三角连接后相间和对地的补偿电感值; C_0 、 C_m 分别为线路对地、互感电容, 为方便分析, 令两回线间的互感电容与单回线内的互感电容相等; R_{LA} 、 L_{LA} 分别为线路等效电阻、电感; 故障位置百分比 $a=L_M/L_N$, 其中, L_M 为故障点到 M 端长度, L_N 为故障点到 N 端长度; \dot{U}_{x1} 、 \dot{U}_{x2} 为线路电感电压分别在线路 M、N 两端的分压; R_1 为过渡电阻; R_{arc} 为电弧电阻。

对于 $\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \dot{U}_{MXi}$ 、 $L_m/k//0.5kC_m$ 和 $aC_0//L_0$ 组成的

闭合回路中, 依照式(2)替换图 1 中的阻抗, 根据基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law, KCL), 故障相带并联电抗器侧耦合电压 \dot{U}_{m1} 如式(1)所示。

$$\dot{U}_{m1} = \frac{1}{k} \frac{X_2}{X_2 + X_3} \sum_{i=1}^k \dot{U}_{MXi} \quad (1)$$

$$\begin{cases} X_2 = X_{L0} // X_{C0} \\ X_3 = X_{Lm} // X_{Cm} \end{cases} \quad (2)$$

式中: X_{Cm} 、 X_{C0} 分别为 C_m 、 C_0 的容抗; X_{Lm} 、 X_{L0} 分别为 L_m 、 L_0 的感抗。

准三相运行方式是指同杆双回输电线路在线路发生故障时, 保留三相非同名健全相线路组成单回全相运行方式。由公式(1)可知, 当准三相运行时, 由于三相非同名相电压相位对称, 其耦合电压 \dot{U}_{MXi} 几乎为零, 则故障相端电压 \dot{U}_{m1} 幅值很小, 对故障性质判别不利。

为增加故障相端电压 \dot{U}_{m1} 幅值, 有利于故障性质判别, 由公式(1)可以看出, 增加故障相耦合电压幅值, 即可达到目的。基于此, 提出一种适用于带

并补同杆双回线路跨线接地故障的准两相跳闸策略, 将故障后健全相的数量只保留两相, 破坏准三相运行方式电气量相互抵消, 为故障相增加耦合电压和耦合电流, 以快速准确判断故障性质。跳闸策略如下:

1) 当同杆双回输电线路健全相数量大于两相时, 考虑到均衡断路器使用寿命, 需要根据断路器跳闸的历史数据, 选择跳闸次数最多的两非同名相作为保留相; 若各相跳闸次数一样, 则按回数 and 相序排序, 保留回数 and 相序靠前的两非同名相作为保留相。

2) 当同杆双回线路仅剩两相健全相时, 跳开所有故障相, 两相健全相作为保留相。

3) 当同杆双回线路仅剩一相健全相时, 两回输电线路全部跳闸, 并闭锁, 在线路检修前不考虑线路重合^[19-21]。

2 故障相无功功率特征分析

故障相无功功率计算方法采用瞬时功率算法, 假设 IA 相为故障相之一, IA 相的无功功率计算具体步骤如下:

1) 准两相跳闸策略执行完毕后, 在线路首端电流互感器和电压互感器安装点, 采集 IA 相电压 u_{IA} 、电流 i_{IA} , 并通过模数转换, 将二者转换为数字信号, 采样频率为 4 000 Hz。

2) 由于线路采集的信号为利用瞬时功率算法计算故障相无功功率, 如式(3)所示。

$$Q(n) = \frac{\sum_{m=n}^{n+4000T} u_{IA\text{Hilbert}}(m) i_{IA}(m)}{4000T} \quad (3)$$

式中: 各变量均为数字信号; $u_{IA\text{Hilbert}}(m)$ 为使用 Hilbert 变换将 $u_{IA}(m)$ 移相 90° 后的结果; T 为一个工频周期。

3) 通过数模转换, 将计算所得 $Q(n)$ 转换为模拟信号。

2.1 永久性故障时故障相无功功率特征

如图 1 所示, 当开关 K1、K2 均闭合时, 为同杆双回输电线路永久性故障。此时, 故障线路电气量通过过渡电阻 R_1 与大地相连。故障相线路中仅含健全相耦合产生的电压、电流工频交流分量以及并联电抗器对地放电产生的电流直流分量, 如式(4)所示。

$$\begin{cases} u_{IA}(t) = U_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) \\ i_{IA}(t) = I_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + I_d e^{-At} \end{cases} \quad (4)$$

式中: U_1 为故障相电压工频分量的幅值; ω_1 为该电

压、电流工频分量的角频率, 其大小为 100π ; ϕ_1 为故障相电压工频分量的初相角; I_1 为故障相电流工频分量的幅值; φ_1 为故障相电流工频分量的初相角; I_d 为故障相电流中衰减的直流分量幅值; A 为故障相电流直流分量的衰减时间常数。

根据式(3), 永久性故障时, 故障相无功功率为

$$Q_A(t) = \int_t^{t+T} \frac{u_{A\text{Hilbert}}(\tau) i_A(\tau)}{T} d\tau = Q_{A0}(t) + Q_{A1}(t) \quad (5)$$

式中, $Q_{A0}(t)$ 、 $Q_{A1}(t)$ 分别为故障相无功功率的工频分量与直流分量, 其分别为

$$Q_{A0}(t) = \frac{U_1 I_1}{2} \sin(\phi_1 - \varphi_1) \quad (6)$$

$$Q_{A1}(t) = \frac{A U_1 I_d}{T(\omega_1^2 - A^2)} \left[e^{-A(t+T)} - e^{-At} \right] \cdot \left[\sin(\omega_1 t + \phi_1) + \frac{\omega_1}{A} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \right] \quad (7)$$

由图 1 可以看出: 永久性故障时故障相工频电压为过渡电阻与故障相首端阻抗端电压, 相比于相间等效 LC 并联回路分压, 工频电压可以忽略不计; 并且, 永久性故障时工频电流较小, 直流分量迅速衰减。因此, 由式(6)和式(7)可以看出, 永久性故障时, 故障相无功功率几乎为零。

2.2 瞬时性故障熄弧后故障相无功功率特征

当同杆双回线路跨线接地故障为瞬时性且已熄灭时, 图 1 中开关 K1、K2 均断开, 故障相中存在两条振荡回路:

1) 故障相与健全相之间由 L_m 和 C_m 产生的频率为 ω_1 的工频振荡回路;

2) 故障相与地之间由 L_0 和 C_0 产生的频率为 ω_2 的自由振荡回路。

此种情况下, 故障相电压、电流分别为

$$\begin{cases} u_{IA}(t) = U_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + U_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2) \\ i_{IA}(t) = I_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + I_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \end{cases} \quad (8)$$

式中, U 、 I 、 ω 、 $\phi(\varphi)$ 分别为电压幅值、电流幅值及其角频率和初相角, 下标 1、2 分别表示基频分量和自由分量。

振荡频率不同的回路电压、电流叠加之后, 根据式(3)计算得到的故障相无功功率包含频率分别为 0 、 $2\omega_1$ 、 $2\omega_2$ 、 $(\omega_1 + \omega_2)$ 和 $(\omega_1 - \omega_2)$ 的 5 个不同的频率分量, 如式(13)~式(17)所示^[22]。

$$Q_1(t) = -\frac{U_1 I_1}{2} \sin \theta_{11} - \frac{U_2 I_2}{2} \sin \theta_{22} \quad (9)$$

$$Q_2(t) = -\frac{U_1 I_1 \sin(\omega_1 T)}{2\omega_1 T} \sin[\omega_1(2t + T) + \gamma_{11}] \quad (10)$$

$$Q_3(t) = -\frac{U_2 I_2 \sin(\omega_2 T)}{2\omega_2 T} \sin[\omega_2(2t+T) + \gamma_{22}] \quad (11)$$

$$Q_4(t) = -\frac{U_1 I_2}{\alpha T} \sin \frac{\alpha T}{2} \sin\left[\frac{\alpha(2t+T)}{2} + \gamma_{12}\right] - \frac{U_2 I_1}{\alpha T} \sin \frac{\alpha T}{2} \sin\left[\frac{\alpha(2t+T)}{2} + \gamma_{21}\right] \quad (12)$$

$$Q_5(t) = \frac{U_2 I_1 - U_1 I_2}{\beta T} \sin \frac{\beta T}{2} \sin\left[\frac{\beta(2t+T)}{2} - \theta_{21}\right] - \frac{2U_1 I_2}{\beta T} \sin \frac{\beta T}{2} \sin \frac{\theta_{12} + \theta_{21}}{2} \cdot \cos \frac{\beta(2t+T) + \theta_{12} - \theta_{21}}{2} \quad (13)$$

其中,

$$\begin{cases} \gamma_{jk} = \phi_j + \varphi_k \\ \theta_{jk} = \phi_j - \varphi_k \end{cases}, j=1,2, k=1,2 \quad (14)$$

式中, U 、 I 、 ω 、 θ 分别为电压幅值、电流幅值及其角频率和初相角, 下标 1、2 分别表示基频分量和自由分量。带并补电抗线路等效感抗远大于等效电阻, 故有:

$$\begin{cases} \varphi_{11} = \varphi_{22} \approx \pi/2 \\ \varphi_{12} + \varphi_{21} = (\theta_{u1} - \theta_{i1}) + (\theta_{u2} - \theta_{i2}) \approx \pi \end{cases} \quad (15)$$

式中, 下标 u、i 分别表示电压量和电流量。

忽略健全相电磁耦合影响时:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (16)$$

将式(15)、(16)代入式(9)一式(13), 当健全相频率为工频时, 可得:

$$\begin{cases} Q_1(t) \approx -\frac{U_1 I_1 + U_2 I_2}{2} \\ Q_2(t) = 0 \\ Q_5(t) \approx \frac{-2U_1 I_2}{\beta T} \sin \frac{\beta T}{2} \cos \frac{\beta(2t+T) + \varphi_{12} - \varphi_{21}}{2} \end{cases} \quad (17)$$

$Q_3(t)$ 、 $Q_4(t)$ 的形式并未受到式(15)、式(16)的影响。然而, 由于 $\beta \ll \alpha < 2\omega_2$, $Q_5(t)$ 的振幅远大于 $Q_3(t)$ 和 $Q_4(t)$ 。因此, 当同杆双回输电线路跨线接地故障为瞬时性且电弧已熄灭时, 相间无功功率的特征主要体现为幅值较为显著的直流和低频分量的叠加。

2.3 瞬时性故障熄弧前故障相无功功率特征

当同杆双回线路跨线接地故障为瞬时性且电弧未熄灭时, 如图 1 中, K1 闭合、K2 断开。由电弧特性可知, 电弧电阻为一动态变化, 且趋势为逐渐增大的可变电阻。由于电弧是一个燃烧-熄灭-燃

烧反复循环的过程, 且其每次熄灭时长会随着电弧电阻的增大而逐渐延长, 因此, 瞬时性故障熄弧的过程可以视为一个动态的, 由电弧持续燃烧过渡到电弧熄灭再燃烧再熄灭, 直到故障相电流减小至不足以维持电弧燃烧而永久熄灭的过程。在这一过程中, 故障相无功功率会随着电弧燃烧持续时间的延长而逐渐增加, 而在电弧熄灭瞬间, 线路无功功率有较明显的跃升。瞬时性故障未熄弧状态在整个电弧过程中表现出来的无功功率幅值较小。

3 基于无功功率的熄弧判据

3.1 熄弧判据

通过对同杆双回输电线路跨线接地故障永久性故障、瞬时性故障熄弧前和瞬时性故障熄弧后的无功功率特性分析可以看出, 采用 $Q_5(t)$ 的振幅作为电弧熄弧与否的判断条件, 能够提高判断准确度和可靠性。理论上, 故障性质为永久性故障或者瞬时性故障未熄弧状态, $Q_5(t)$ 幅值应该为零, 但是, 由于实际应用中扰动和干扰的存在, 使得 $Q_5(t)$ 幅值较小。因此, 根据同杆双回输电线路跨线接地故障中瞬时性故障和永久性故障、瞬时性故障未熄弧状态无功功率低频分量 $Q_5(t)$ 幅值的巨大差异制定熄弧判据。同杆双回输电线路跨线接地故障熄弧判据表述为

在连续的 0.03 s 内, 如果

$$Q(t) > KI_{sc_max}^2 X_{LA} \quad (18)$$

成立, 则故障为瞬时性故障, 延迟 0.01 s 后可重合故障相。式中: $Q(t)$ 为经滤波处理后的相间无功功率, 滤波器为带通型, 上下截止频率分别为 3 Hz 和 30 Hz; I_{sc_max} 为线路跳闸前的运行方式下可能产生的最大潜供电流; X_{LA} 为线路故障相等效感抗; K 为比例系数, 其求法如式(19)所示。

$$K = b_s(1 + b_n)^2 \quad (19)$$

式中: b_s 为裕度系数, 其取值范围为 1.1~1.5; b_n 为故障相电压差的谐波失真系数(Total Harmonic Distortion, THD), 本文取为 0.4。

最大潜供电流 I_{sc_max} 为线路计算方法如下^[23]:

$$\lambda = \frac{\omega l}{v} = \frac{2\pi \times 50 \times 2l}{3 \times 10^5} = 2.09 \times 10^{-3} l \quad (20)$$

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{v}{v_0} \quad (21)$$

$$K_m = \frac{I_{dm}}{I_N} \quad (22)$$

$$K_m = \frac{\lambda_0^2}{6} \left(1 - \frac{Z}{Z_0} \times \frac{v_0}{v}\right) \quad (23)$$

$$I_N = \frac{U}{Z} \quad (24)$$

式中: Z 和 Z_0 为同杆双回输电线路正序和零序波阻; v 和 v_0 为正序和零序波速; λ 和 λ_0 为正序和零序工频波长(单位为 rad)。

可得到最大潜供电流 I_{dm} 为

$$I_{dm} = K_m I_N = \frac{(2.09 \times 10^{-3} l \frac{v}{v_0})^2}{6} (1 - \frac{Z}{Z_0} \times \frac{v_0}{v}) \frac{U}{Z} \quad (25)$$

式中, 零序和正序波速比 $v_0/v = 3/4$ 。

通过进一步分析发现, 无功功率低频分量的正负不影响对其故障性质的判定, 并且, $Q(t)$ 第一个周期幅值最大, 对熄弧判定最有利。因此, 将 $Q(t)$ 取绝对值, 使其每个周期峰值都能够参与熄弧与否的判断中, 具体判据为: 在连续的 0.03 s 内, 满足判据式(26), 故障为瞬时性故障, 否则为永久性故障或者瞬时性故障未熄弧状态。

在连续的 0.03 s 内, 如果

$$Q(t) > KI_{sc_max}^2 X_{LA} \quad (26)$$

改进后的熄弧判据将无功功率低频分量的每个周期幅值都能够作为判别依据, 降低了熄弧判定时间, 增加了故障性质判断准确率。

3.2 合闸策略

限于篇幅, 同杆双回输电线路跨线接地故障在合闸时不考虑发展性故障, 如 IAIIBC 在接地故障消失后可能发展为 IAIIBC 跨线不接地故障, 因此, 本文的讨论范围仅限于同杆双回输电线路跨线接地故障重合闸策略。同杆双回输电线路跨线接地故障重合闸策略为

1) 当故障相在最大重合时间 1.5 s 内满足式(26)熄弧判据时, 延迟 0.1 s, 合闸全部跳开的健全相和故障相;

2) 当故障相在 1.5 s 内不满足式(26)熄弧判据时, 认为故障相为永久性故障或者瞬时性故障未熄弧状态, 双回线路全部跳开不再重合, 并闭锁重合闸。

3.3 自适应重合闸策略

针对带并联电抗器同杆双回输电线路在传统重合闸跳闸策略下跨线接地故障会造成两回输电线路都跳闸的问题, 提出了基于故障相无功功率的带并补同杆双回输电线路跨线接地故障自适应重合闸策略。该策略大大提高了带并补同杆双回输电线路跨线接地故障重合成功率。自适应重合闸策略如图 2 所示。

1) 带并补同杆双回输电线路发生跨线接地故障, 根据准两相跳闸策略, 故障相和相应的健全相跳闸, 计时器归零;

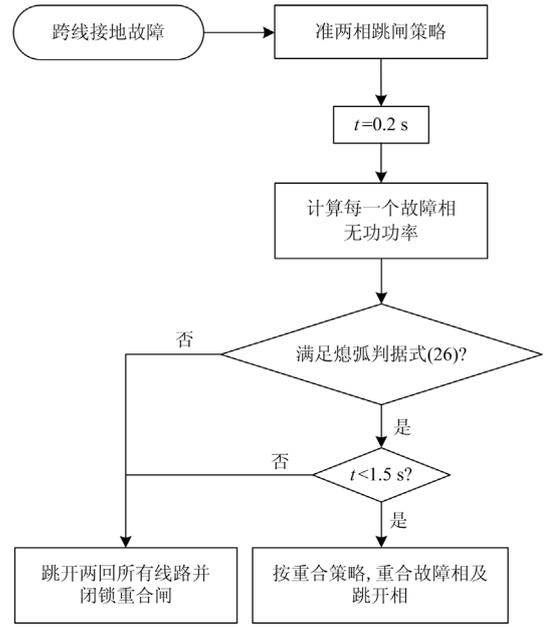


图 2 自适应重合闸策略流程图

Fig. 2 Flowchart of the proposed adaptive auto-reclosing scheme

2) 为避免电弧暂态对电弧熄弧判别的影响, 当计时器达到 0.2 s 时开始计算故障相无功功率;

3) 若计时器在 1.5 s 前所有故障相无功功率能够满足熄弧判据式(26), 表明故障为瞬时性故障, 重合所有跳开的健全相和故障相; 否则为永久性故障或者瞬时性故障未熄弧状态。跳开两回所有相线路并闭锁重合闸, 在线路未检修之前不再重合线路。

4 仿真实验

为了验证本文提出的自适应重合闸策略的正确性, 以同杆双回输电线路发生 IAIIBC 跨线接地故障为例, 参照新疆哈密地区某 220 kV 同杆双回输电线路, 以 PSCAD/EMTDC 为研究平台, 构建仿真模型, 验证所提出自适应重合闸策略的正确性。算例线路所处局部电网的地理接线图如图 3 所示。单位长度送出线路参数如表 1 所示。

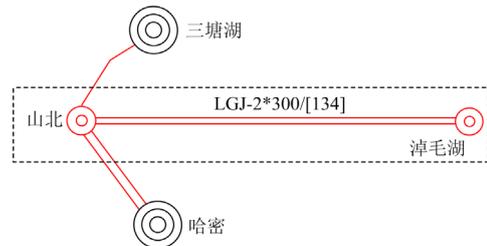


图 3 仿真算例地理接线图

Fig. 3 Geographical wiring diagram of the simulation example

表 1 单位长度送出线路参数

Table 1 Parameters per unit length of the outgoing line

正序电阻/ (Ω/km)	正序电抗/ (Ω/km)	正序容抗/ (MΩ·km)	零序电阻/ (Ω/km)	零序电抗/ (Ω/km)	零序容抗/ (MΩ·km)
0.107	0.418	0.273	0.321	1.254	0.414

带并补同杆双回输电线路发生跨线接地故障，设定故障发生时间为 2.5 s；考虑到接地故障过渡电阻一般不大，本算例的过渡电阻分别考虑 0 Ω 和 100 Ω；故障位置分别考虑线路首端($L_f=0\%$)、线路中点($L_f=50\%$)和线路末端($L_f=100\%$)；跳闸相初始时间为 2.55 s；线路并补补偿度为 70%。整定值设定如下：据表 1 数据和公式(25)可计算得 $I_{sc_max}=30.1$ A；设定 b_s 为 1.2， b_h 为 0.4，由此算得合闸熄弧判据定值为 0.358 Mvar。引入式(27)一式(30)所示二次电弧模型^[23]，并设定三种故障时长：(1) 若故障为瞬时性且被外部干扰熄弧，故障时长 $t_f=0.3$ s；(2) 若故障为瞬时性且无外部干扰，其自然熄弧时间不定，需根据仿真运行实际确定，故障时长 $t_f=N_s$ ；(3) 若故障为永久性，短路电弧模型，故障时长 $t_f=\infty$ 。

$$\frac{dg_{arc}}{dt} = \frac{G_{arc} - g_{arc}}{T_{arc}} \quad (27)$$

$$G_{arc} = \frac{|i_{arc}|}{u_{arc0} L_{arc}} \quad (28)$$

$$T_{arc} = T_{arc0} \left(\frac{L_{arc0}}{L_{arc}} \right)^\sigma \quad (29)$$

$$L_{arc} = \begin{cases} L_{arc0} & t_{arc} \leq 0.1 \text{ s} \\ 10t_{arc} L_{arc0} & t_{arc} > 0.1 \text{ s} \end{cases} \quad (30)$$

上述各式中各变量的含义见文献[24]。

以同杆双回输电线路发生 IAIIBCG 跨线接地故障为例，采用无功功率分析方法，其无功功率随时间变化如图 4—图 9 所示。同杆双回输电线路发生单-单跨线接地故障(以 IAIAG 为例)，双双跨线接地故障(以 IABIIBCG 为例)和单三跨线接地故障(以 IAIIBCG 为例)的仿真波形分析方法与单双跨线接地故障类似，限于篇幅，本文不再详细分析。

由图 4—图 9 可以看出：

1) 故障相无功功率经过较长时间累积仍不满足整定值，表明故障相未能熄弧，故障性质为永久性故障或者瞬时性故障未熄弧状态，熄弧判据能够准确快速进行判定。

2) 故障相无功功率迅速累积，其幅值越过整定值并维持至少 0.03 s，表明故障相已经熄弧，故障性质为瞬时性故障，熄弧判据能够准确快速判定。

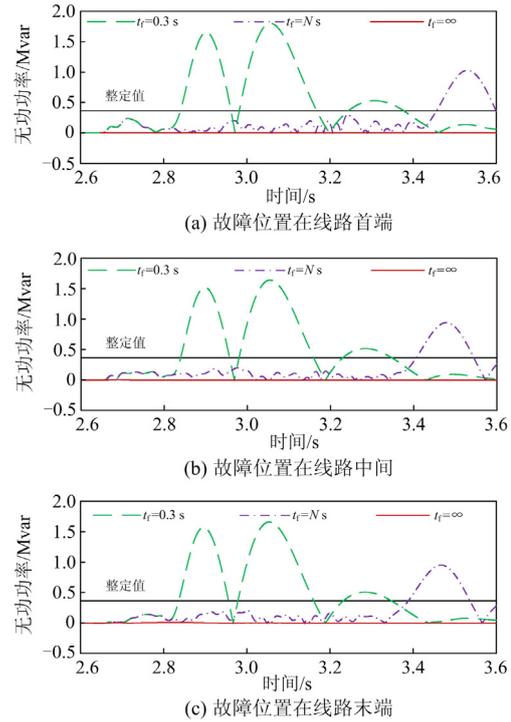


图 4 过渡电阻为 0 Ω, IAIIBCG 中 IA 相无功功率
Fig. 4 Reactive power of phase IA when transition resistance is 0 Ω

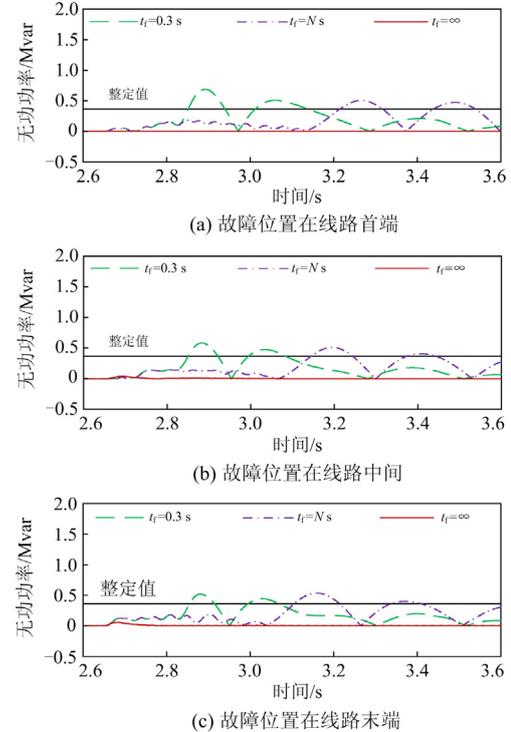


图 5 过渡电阻为 0 Ω, IAIIBCG 中 IIB 相无功功率
Fig. 5 Reactive power of phase IIB when transition resistance is 0 Ω

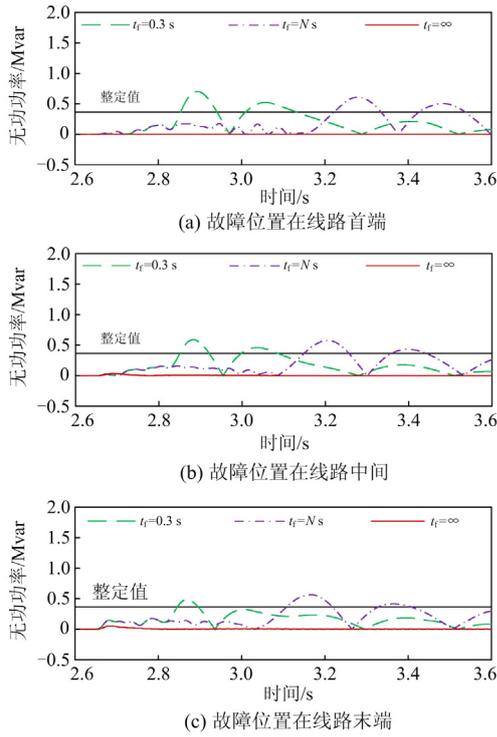


图 6 过渡电阻为 0Ω , IAIIBCG 中 IIC 相无功功率
Fig. 6 Reactive power of phase IIC when transition resistance is 0Ω

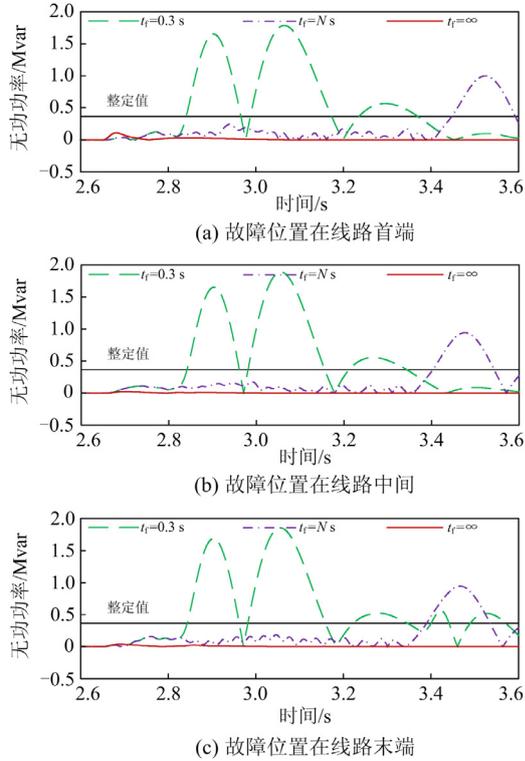


图 7 过渡电阻为 100Ω , IAIIBCG 中 IA 相无功功率
Fig. 7 Reactive power of phase IA when transition resistance is 100Ω

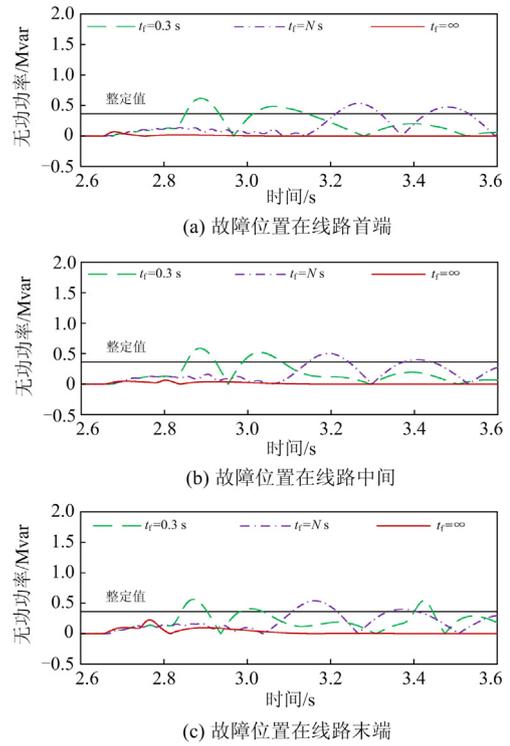


图 8 过渡电阻为 100Ω , IAIIBCG 中 IIB 相无功功率
Fig. 8 Reactive power of phase IIB when transition resistance is 100Ω

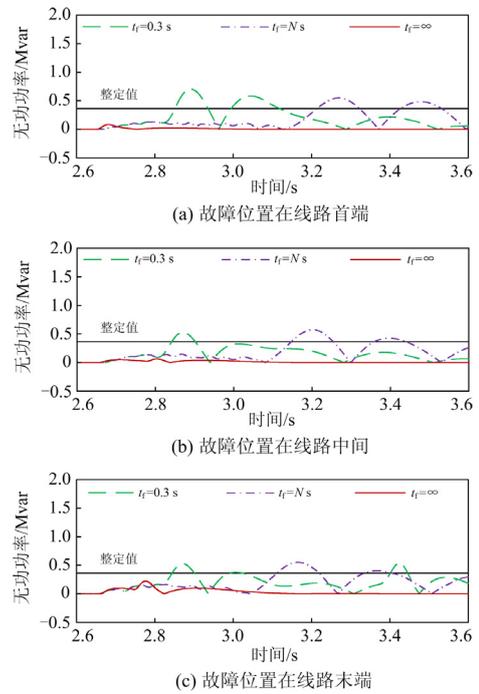


图 9 过渡电阻为 100Ω , IAIIBCG 中 IIC 相无功功率
Fig. 9 Reactive power of phase IIC when transition resistance is 100Ω

3) 不论故障发生在线路首端、中间或者末端，其过渡电阻为何值，故障持续多长时间，本文所提出的熄弧判据都能够快速、准确判断故障性质，为自适应重合闸策略提供重合依据。结果表明：本文所提自适应重合闸策略能够快速判定故障性质，增加线路重合成功几率，并且不受故障位置、过渡电阻大小以及故障持续时间的影响。

5 结论

本文针对带并联电抗器同杆双回输电线路传统重合闸策略不判定故障性质而盲目重合，重合失败对系统造成二次冲击的问题，提出了基于故障相无功功率的带并联电抗器同杆双回输电线路跨线接地故障自适应重合闸策略，总结如下：

- 1) 准两相跳闸策略将为带并联电抗器同杆双回输电线路跨线接地故障相提供充足耦合电气量，为故障性质判定奠定基础；
- 2) 基于无功功率方法的故障熄弧判据，能够不受故障位置、过渡电阻大小以及故障持续时间的影响，快速、准确判断故障性质；
- 3) 基于无功功率带并联电抗器同杆双回输电线路跨线接地故障自适应重合闸策略增加了故障重合成功率的同时，还降低了判定时间，为发展性故障性质判定奠定了基础。

参考文献

[1] 赵冠琨, 贾科, 陈金锋, 等. 基于断路器重合闸的柔性直流输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 48-56.
ZHAO Guankun, JIA Ke, CHEN Jinfeng, et al. A single terminal fault location method for a DC transmission line based on circuit breaker reclosing[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 48-56.

[2] 王帅, 熊凌飞, 郭庆雷, 等. 渝鄂背靠背柔性直流工程交流侧单相重合闸问题分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 174-181.
WANG Shuai, XIONG Lingfei, GUO Qinglei, et al. Analysis of AC side single-phase reclosing problem of Chongqing-Hubei back to back MMC-HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 174-181.

[3] 郑涛, 吕文轩. 基于级联全桥型直流断路器的直流配电网自适应重合闸方案[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 78-86.
ZHENG Tao, LÜ Wenxuan. Adaptive reclosing scheme for DC distribution network based on cascaded full-bridge DC circuit breaker[J]. Automation of Electric Power

Systems, 2020, 44(22): 78-86.

[4] 刘健, 张志华, 芮俊, 等. 一二次配合的配电线路自适应重合闸[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 26-32.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, RUI Jun, et al. Adaptive reclosing of distribution lines based on primary and secondary device coordination[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 26-32.

[5] 李召兄, 文俊, 徐超, 等. 特高压同塔双回输电线路的潜供电流[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 148-154, 163.
LI Zhaoxiong, WEN Jun, XU Chao, et al. Secondary arc current of UHV double-circuit transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 148-154, 163.

[6] WANG Y, YIN X, XU W, et al. Fault line selection in cooperation with multi-mode grounding control for the floating nuclear power plant grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 164-173.

[7] 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 Zhihui, CHEN Jun, et al. Application of adaptive auto-reclosure in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 152-156.

[8] 陈曦, 张旭, 徐振宇, 等. 高速接地开关熄灭特高压平行双回线路二次电弧分析[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 268-274.
CHEN Xi, ZHANG Xu, XU Zhenyu, et al. Analysis on extinguishing secondary arc in UHVAC parallel double-circuit transmission lines by high speed grounding switch[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 268-274.

[9] LIN D, WANG H, LIN D, et al. An adaptive reclosure scheme for parallel transmission lines with shunt reactors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(6): 2581-2589.

[10] 丁伟. 广域继电保护与同杆双回线自适应重合闸技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
DING Wei. Research on wide-area relaying protection and adaptive reclosing technique for parallel lines on the same tower[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.

[11] 李博通, 李永丽. 基于故障点电压特征的同杆双回线自适应重合闸[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 46-54.
LI Botong, LI Yongli. An adaptive autoreclosure technique for double-circuit transmission line based on voltage characteristics at fault point[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 46-54.

[12] 刘毅, 张哲, 尹项根, 等. 同杆并架双回线自适应重合闸组合判据[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 56-61.

- LIU Yi, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. An combination criterion on adaptive reclosure for double transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2): 56-61.
- [13] 林达, 王慧芳, 王庆庆, 等. 带并联电抗器同杆双回线跨线故障性质判别方法[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 2001-2007.
- LIN Da, WANG Huifang, WANG Qingqing, et al. A method to identify properties of cross-country faults occurred in common-tower double-circuit transmission line with shunt reactors[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 2001-2007.
- [14] 林达, 王庆庆, 王慧芳, 等. 带并联电抗器同杆双回线自适应重合闸方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 101-106.
- LIN Da, WANG Qingqing, WANG Huifang, et al. Adaptive reclosure scheme for parallel lines with shunt reactors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 101-106.
- [15] 杨雯, 尹康涌, 鲍奕宇, 等. 基于深度置信网络的电网故障类型辨识[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 169-177.
- YANG Wen, YIN Kangyong, BAO Yiyu, et al. Fault types identification of power grid based on deep belief network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 169-177.
- [16] 徐皓远, 刘波, 叶开, 等. 基于零序电流分布特性的配电网故障区段辨识[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 110-117, 164.
- XU Haoyuan, LIU Bo, YE Kai, et al. Identification of fault zones in distribution network based on zero sequence current distribution characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 110-117, 164.
- [17] 刘明, 曾成碧, 苗虹. 考虑风电不确定性的分布鲁棒机会约束机组组合模型[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 51-57.
- LIU Ming, ZENG Chengbi, MIAO Hong. Distributionally robust chance-constrained unit commitment model considering uncertainty of wind power[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 51-57.
- [18] 付豪, 杨星磊, 张斌, 等. 考虑大规模新能源接入的变压器热寿命损失分析[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6): 53-60.
- FU Hao, YANG Xinglei, ZHANG Bin, et al. Analysis of transformer thermal life loss considering large-scale new energy resources access[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6): 53-60.
- [19] 梁路明, 李凤婷, 解超, 等. 基于缺相耦合电压特性的同杆双回线路非跨线故障综合重合闸策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 62-69.
- LIANG Luming, LI Fengting, XIE Chao, et al. Open-phase coupling voltage feature based comprehensive reclosure for double-circuit lines non-line-to-line fault[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 62-69.
- [20] 邓雯玲, 卢继平, 苟鑫, 等. 适用于高压电缆-架空线混合线路的新型重合闸方案[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(12): 126-132.
- DENG Wenling, LU Jiping, GOU Xin, et al. Novel reclosing scheme for hybrid lines with high-voltage cable and overhead lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 126-132.
- [21] 解超, 李凤婷, 王宾, 等. 基于功率比的带并补电抗风电送出线自适应单相重合闸策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 196-201.
- XIE Chao, LI Fengting, WANG Bin, et al. An adaptive single-phase reclosing scheme based on power ratio for wind power outgoing line with shunt reactors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 196-201.
- [22] XIE C, LI F, WANG B, et al. Anti-interference adaptive single-phase auto-reclosing schemes based on reactive power characteristics for transmission lines with shunt reactors[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 170: 176-183.
- [23] 陈禾, 陈维贤. 超、特高压输电线路中潜供电流的电路分析和计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2368-2373.
- CHEN He, CHEN Weixian. Circuit analysis and computation of secondary current in EHV and UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2368-2373.
- [24] ZHOU W, LI F, XIE C, et al. Adaptive autoreclosing scheme for line-to-line nongrounded faults on double-circuit transmission lines based on phase-to-phase reactive power[J]. IEEE Access, 2020, 8: 144092-144104.

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-06-21

作者简介:

周伟绩(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zwj2015@shzu.edu.cn

李凤婷(1965—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护, 可再生能源并网技术及电力系统调度控制; E-mail: xjft2009@sina.com

解超(1987—), 男, 博士, 研究方向为电力系统继电保护及可再生能源并网技术。E-mail: cheesemonster@sina.com

(编辑 葛艳娜)