

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230938

适用于带并抗的同杆双回线接地故障分相自适应重合闸策略

蒋江波, 解超, 李凤婷, 尹纯亚, 张高航

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 同杆双回线发生接地故障采用传统跳闸策略时可能会产生负序分量, 传统自动重合闸方案在合闸前不判定故障性质, 重合失败时将影响系统稳定性。针对该问题, 提出了一种适用于带并抗的同杆双回线接地故障改进跳闸与分相自适应重合闸策略。首先, 通过建立带并抗的同杆双回线各相之间的耦合模型并对其进行分析, 提出了一种能够避免负序分量注入系统的改进跳闸策略。其次, 分别对瞬时性故障和永久性故障情况下的故障相并联电抗器电流特征分析, 提出了基于故障相并联电抗器微分栅电流的故障性质判据。最后, 结合改进跳闸策略和故障性质判据, 形成了适用于带并抗的同杆双回线接地故障分相自适应重合闸策略。PSCAD/EMTDC 仿真验证了所提改进跳闸与分相自适应重合闸策略能够避免负序分量注入系统, 以及在不同接地故障类型、故障位置和过渡电阻情况下都能保证输电线路重合成功率。

关键词: 自适应重合闸; 微分栅; 故障性质判据; 瞬时性故障; 永久性故障

Phase-separation adaptive autoreclosing strategy for ground faults on double-circuit transmission lines with shunt reactors

JIANG Jiangbo, XIE Chao, LI Fengting, YIN Chunya, ZHANG Gaohang

(College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: When a ground fault occurs on double-circuit transmission lines, the conventional tripping strategy may inject negative sequence components into the system. In addition the traditional autoreclosing scheme does not determine the fault feature before reclosing, and if it is reclosed to a permanent fault, the stability of the power system will be affected. To solve the above problems, phase-separation adaptive autoreclosing suitable for grounding faults on double-circuit transmission lines with shunt reactors is proposed. First, by establishing and analyzing the phase-to-phase coupling model of double-circuit transmission lines with shunt reactors, an improved tripping strategy that can avoid the injection of negative sequence components into the power system is proposed. Secondly, faulty phase shunt reactor current characteristics are analyzed for transient and permanent fault cases, respectively, and the fault nature criterion based on differential gate current of a faulty phase shunt reactor is proposed. Finally, the improved tripping strategy and fault nature criterion are combined to form a phase-separation adaptive autoreclosing suitable for grounding faults on double-circuit transmission lines with shunt reactors. The PSCAD/EMTDC simulation verifies that the proposed improved tripping strategy and phase-separation adaptive autoreclosing can avoid the injection of negative sequence components into the system and ensure the reclosing success rate of the transmission line in different ground fault types, fault locations and transition resistances.

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

Key words: adaptive autoreclosing; differential grating; fault nature criterion; transient failure; permanent failure

0 引言

同杆双回输电线具有传输容量大、所占走廊小

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877185); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助(2021D01C087)

等优点, 与此同时因故障种类繁多, 给重合闸逻辑制定带来困难^[1-2]。据统计, 80%的高压架空输电线路故障为瞬时性故障^[3], 实际工程中大多采用自动重合闸以提高供电可靠性, 但是自动重合闸若重合于永久性故障, 则会对电网造成二次冲击, 而自适应重合闸在断路器合闸前能够判别故障性质, 即识

别瞬时性故障和永久性故障^[4-6]。此外, 负序分量注入系统会增加高压直流输电系统连续换相失败的风险^[7-8]以及加剧双馈风电机组定转子绕组的发热, 影响系统稳定性。

针对上述问题, 国内外学者对自适应重合闸开展了深入的研究。文献[9]采用准三相跳闸策略, 虽能很大程度上减少了两回输电线路全部跳闸, 但是由于三相对称, 对故障相的耦合电气量很小, 很难判别故障性质。针对此问题, 文献[10]采用准两相跳闸策略即当同杆双回输电线路发生接地故障时, 只保留两相异名健全相, 其余相全部跳闸, 此策略虽为故障相提供了较强的电气耦合量, 有利于故障性质的判定, 但是由于两相运行, 会给系统注入负序分量。文献[11]进一步研究了高压直流输电系统逆变侧交流系统发生不对称故障时, 负序分量会增加换相失败的风险, 影响电力系统稳定性。文献[12-14]提出用并联电抗器电流和功率判别故障性质, 但该方法非全相运行时会给系统注入负序分量。文献[15]通过附加变频电源的方法判别故障性质, 该方法还需要加装开关和检测设备, 改造成本相对较大。文献[16-18]研究了三相跳闸后线路电气量迅速衰减, 通过附加电容的方式增加线路电气量判别故障性质, 但电容充放电时产生的电流会延长二次电弧的熄灭时间。文献[19]利用快速接地开关释放线路的残余能量让电弧快速熄灭, 提高输电线路重合成功率, 但是当永久性故障时该策略不可用。文献[20-23]研究了基于故障相电压幅值、故障相电气量智能算法、模糊识别和自由振荡分量的熄弧判据, 但这些方法都是基于复杂的电弧模型的, 并且对高频信号的采集不易准确获取, 当二次电弧自然熄灭时, 故障相的能量在熄弧前后变化不大。其次基于二次电弧阶段的熄弧判据不仅要有准确的电弧模型, 而且对暂态信号的采集和数据处理有很高要求, 所以基于二次电弧阶段的熄弧判据并未得到实际应用^[24]。

据此本文针对带并联电抗器的同杆双回输电线路接地故障分相自适应重合闸策略展开研究。首先, 提出一种在带并联电抗器的同杆双回输电线路发生接地故障时, 能够避免负序分量注入系统的改进跳闸策略, 以及二次电弧熄灭后合闸非故障相单端分相开关来达到提高故障相并联电抗器拍频电流的幅值; 其次, 通过对瞬时性和永久性接地故障情况下故障相并联电抗器电流特征的分析, 提出了基于故障相并联电抗器微分栅电流的故障性质判据; 最后, 基于故障性质判据, 提出了带并抗同杆双回线接地

故障分相自适应重合闸策略, 通过PSCAD/EMTDC仿真实验验证了所提分相自适应重合闸策略的正确性和可行性。

1 改进跳闸策略

根据引言所述, 实际工程中带并抗的同杆双回输电线路接地故障自适应重合闸存在以下问题。

1) 带并抗的同杆双回线路接地故障自适应重合闸策略采用综合跳闸策略或准两相跳闸策略时, 虽然有利于故障性质判据, 但会给系统注入负序分量, 即准两相跳闸策略是当同杆双回线路发生接地故障时, 只保留两相异名健全相, 其余相全部跳闸。负序分量在大规模交直流混联系统中会增加高压直流输电系统连续换相失败的风险; 负序电流也会加剧双馈风电机组定转子绕组的发热, 并影响系统的稳定运行等。

2) 基于二次电弧阶段的熄弧判据不仅要有准确的电弧模型, 而且对暂态信号的采集和数据处理有很高的要求。

3) 带并联电抗器的同杆双回输电线路发生接地故障时, 若满足准三相则尽可能保持准三相运行, 若不满足准三相跳开所有相。准三相由于三相对称, 故对故障相的电容耦合和电磁耦合很小, 故障相并联电抗器拍频电流的幅值也很小。针对上述问题提出了适用于带并抗的同杆双回线改进跳闸策略。

当线路发生单相接地 IAG 和单-单不同名 IAIIBG 这类接地故障时让系统保持准三相运行, 待二次电弧熄灭以及绝缘恢复后合闸非故障相单端分相开关为故障相提供充足的耦合量; 当线路发生双-双同名 IABIIBCG 这类跨线接地故障时跳开所有相。待二次电弧熄灭以及绝缘恢复后合闸非故障相单端分相开关为故障相提供充足的耦合量, 通过提高拍频电流的幅值更好地判别故障性质。由于合闸非故障相单端分相开关不会构成通路, 故不会给系统注入负序分量, 也不会对系统产生影响。不同接地故障下跳闸相和经延时后重合单相的单端分相开关如表 1 所示。

表 1 各种接地故障下单端分相开关的重合方式
Table 1 Reclosing method of single-ended split-phase switches in various ground fault cases

接地故障	跳闸相	保留相	重合单端分相开关
IAG	IABC	IIABC	IB 或 IC
IAIIBG	IAIIBC 或	IBCHA 或	IB 或 IC
	IACIIB	IBIAC	或 IIA 或 IIC
IABIIBCG	全部六相	无	IC 或 IIA

当线路发生单-双不同名 IAIIBC 这类跨线接地故障时跳开故障相 IAIIBC，健全相 IBCIIA 保持准三相运行。这时采用首次试探的方法判别故障性质，首次重合一相故障相的大电源侧分相开关，若这相故障相不跳闸，说明这相为瞬时性故障，则按照单-单不同名 IAIIBG 这类跨线接地故障判别故障性质；若这相故障相跳闸，说明这相为永久性故障，则继续保持准三相运行并闭锁重合闸。

据此本文提出带并联电抗器的同杆双回输电线路接地故障改进跳闸策略，其流程图如图 1 所示。

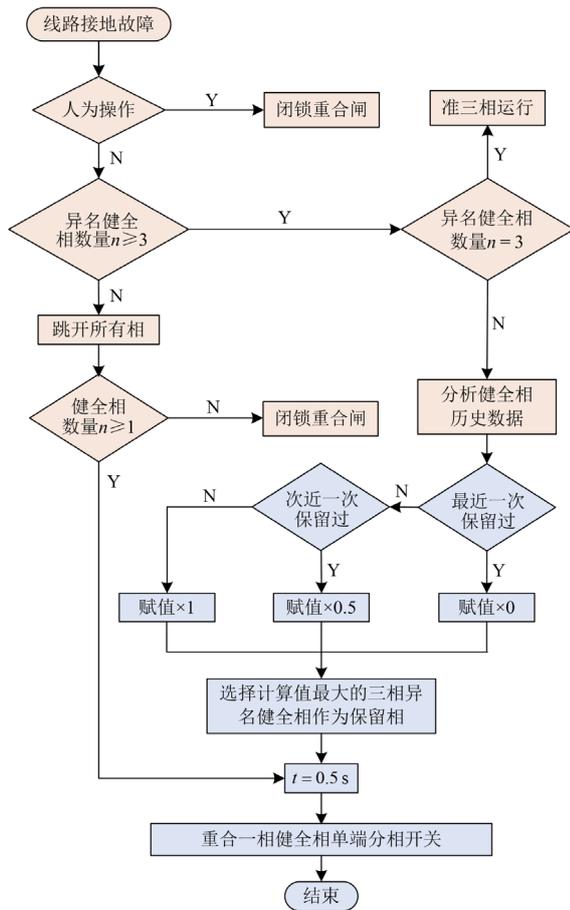


图 1 改进跳闸策略流程图
Fig. 1 Improved trip strategy flowchart

1) 当同杆双回输电线路发生接地故障时，根据改进跳闸策略进行跳闸，计时器归 0。

2) 选择保留相原则是使每个断路器动作概率趋于一致，尽量避免连续跳合闸。将健全相断路器最近一次和次近一次跳合闸数据作为本次跳与否的依据，即最近一次赋值为 0，次近一次赋值为 ×0.5，取赋值最大的三相作为保留相。

3) 考虑到电弧熄灭、绝缘恢复情况以及瞬时性故障持续时间较长的可能性，延时 0.5 s 后合闸非故

障相单端分相开关。

2 故障相并联电抗器电流特征分析

同杆双回输电线路等效模型以及并联电抗器等效变换见附录 A，其中 L_m 和 L_0 分别为并联电抗器共同中性点连接方式经星网变换后相间等效电感和对地等效电感。

在发生单-单不同名 IAIIBG 接地故障后，根据改进跳闸策略跳开 IAIIBC，剩余健全相 IBCIIA 保持准三相运行，准三相运行时三相对称，故并联电抗器中拍频电流幅值很小，待电弧熄灭以及绝缘完全恢复后，通过合闸非故障相 IIC 的单端分相开关，达到提高故障相并联电抗器拍频电流的幅值。当线路发生单相接地 IAG 或两相接地 IABG 时，跳开 IABC，剩余健全相 IIABC 保持准三相运行，待电弧熄灭以及绝缘完全恢复后合闸非故障相 IC 的单端分相开关，对于单相接地与单-单不同名接地故障特性分析类似，故不再赘述。

当发生双-双同名 IABIIBC 这类跨线接地故障时，跳开所有相，待绝缘完全恢复后，通过合闸非故障相 IC 的单端分相开关，增大故障相并联电抗器拍频电流的幅值。

故本文以单-单不同名 IAIIBG 和双-双同名 IABIIBC 跨线接地故障为例进行故障特性分析。

2.1 瞬时性故障时特征分析

单-单不同名 IAIIBG 瞬时性接地故障时，故障相等效电路如图 2 所示。考虑到线路自阻抗与相间互阻抗远小于线路容抗、感抗，为简化计算，故在分析过程中忽略不计，图 2 中： \dot{U}_{IB} 、 \dot{U}_{IC} 、 \dot{U}_{IIA} 为准三相耦合电压源； \dot{U}_{IIC} 为重合单端分相开关的耦合电压源； \dot{U}_a 为故障相电压；部分变量见附录 A。

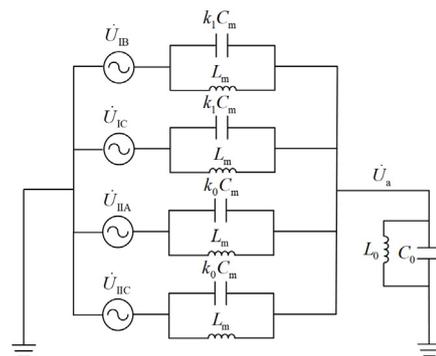


图 2 单-单不同名瞬时性接地故障等效电路
Fig. 2 Equivalent circuit of a non-homonymous single-to-single-phase grounding transient fault

当带并联电抗器的同杆双回输电线路发生接地故障时，从断路器跳闸到故障熄弧期间，故障相对

地电容以及对地电感通过电弧电阻快速放电, 当电弧熄灭时, 电弧电流减小到 0, 此时可认为对地电容以及对地电感的能量很小甚至接近于 0。对图 2 所示的单-单不同名瞬时性接地故障等效电路作拉普拉斯变换, 可得复频域电路, 如图 3 所示。

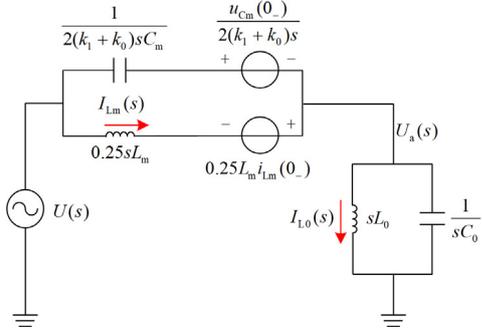


图 3 单-单不同名瞬时性接地故障复频域电路

Fig. 3 Complex frequency domain circuit of a non-homonymous single-to-single-phase grounding transient fault

图 3 表示准三相以及合闸单侧分相开关的这一相对故障相的耦合, 即表示瞬时性故障时, 跳开相应相以及合闸单端分相开关后的阶段。等值电路表示准三相以及合闸单侧分相开关的这一相对故障相的耦合, 合闸单侧分相开关的这一相由于不会构成通路, 因此对系统没有影响。图 3 中: $U_a(s)$ 为故障相电压; $u_{Cm}(0_-)$ 为相间电容初始储能电压; $i_{Lm}(0_-)$ 为相间等效电感初始储能电流。为便于计算, 令 $U(s) = 0.25[U_{IB}(s) + U_{IC}(s) + U_{IIA}(s) + U_{IIC}(s)]$, 其中: $U_{IB}(s)$ 、 $U_{IC}(s)$ 、 $U_{IIA}(s)$ 为准三相运行的电压; $U_{IIC}(s)$ 为单端合闸相电压。

根据图 3 所示的电路可列写结点电压方程, 如式(1)所示。

$$\left(2(k_1 + k_0)sC_m + \frac{4}{sL_m} + sC_0 + \frac{1}{sL_0}\right)U_a(s) - \left(2(k_1 + k_0)sC_m + \frac{4}{sL_m}\right)U(s) = \frac{i_{Lm}(0_-)}{s} - C_m u_{Cm}(0_-) \quad (1)$$

故障相 IA 电压为

$$U_a(s) = \frac{[2(k_1 + k_0)L_m L_0 C_m s^2 + 4L_0]U(s)}{L_m L_0 [2(k_1 + k_0)C_m + C_0]s^2 + 2L_0 + L_m} + \frac{-L_m L_0 C_m u_{Cm}(0_-)s + L_m L_0 i_{Lm}(0_-)}{L_m L_0 [2(k_1 + k_0)C_m + C_0]s^2 + 2L_0 + L_m} \quad (2)$$

故障相 IA 并联电抗器电流为

$$I_{LIA}(s) = I_{L0}(s) - I_{Lm}(s) = \frac{U_a(s)}{sL_0} - \frac{U(s) + 0.25L_m i_{Lm}(0_-) - U_a(s)}{0.25sL_m} \quad (3)$$

化简得

$$I_{LIA}(s) = \frac{(2(k_1 + k_0)L_m C_m - 4L_0 C_0)s \cdot U(s)}{L_m L_0 [2(k_1 + k_0)C_m + C_0]s^2 + 4L_0 + L_m} + \frac{(4L_0 + L_m)(i_{Lm}(0_-) - C_m u_{Cm}(0_-)s)}{s[L_m L_0 [2(k_1 + k_0)C_m + C_0]s^2 + 4L_0 + L_m]} - \frac{i_{Lm}(0_-)}{s} \quad (4)$$

令

$$\dot{U}(t) = 0.25U_m \sin \omega_1 t \quad (5)$$

式中: U_m 为合闸相电压幅值; ω_1 为工频角频率。为便于计算, 设初相角为 0° , 对式(5)作拉普拉斯变换, 得到

$$U(s) = 0.25\omega_1 U_m \frac{1}{s^2 + \omega_1^2} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)得

$$I_{LIA}(s) = \frac{2(k_1 + k_0)L_m C_m - 4L_0 C_0}{L_m L_0 [2(k_1 + k_0)C_m + C_0]} s \cdot \frac{0.25\omega_1 U_m}{s^2 + \omega_1^2} + \frac{(4L_0 + L_m)i_{Lm}(0_-) - (4L_0 + L_m)C_m u_{Cm}(0_-)s}{L_m L_0 [2(k_1 + k_0)C_m + C_0]} - \frac{i_{Lm}(0_-)}{s} \cdot \frac{1}{s \left[s^2 + \left(\sqrt{\frac{4L_0 + L_m}{L_m L_0 [2(k_1 + k_0)C_m + C_0]}} \right)^2 \right]} \quad (7)$$

令

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{4L_0 + L_m}{L_m L_0 [2(k_1 + k_0)C_m + C_0]}} \quad (8)$$

对 $I_{LIA}(s)$ 作拉普拉斯反变换得到

$$\dot{I}_{LIA}(t) = A\omega_1 U_m \cos \omega_1 t - A\omega_1 U_m \cos \omega_2 t - i_{Lm}(0_-) \cos \omega_2 t - C_m u_{Cm}(0_-) \omega_2 \sin \omega_2 t = A\omega_1 U_m \cos \omega_1 t - B \sin(\omega_2 t + \alpha) \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} A = \frac{0.5C_m(2L_0 C_0 - (k_1 + k_0)L_m C_m)}{2(k_1 + k_0)L_0 C_m - 4L_0 C_m + L_0 C_0 - L_m C_m} \\ \alpha = \arctan \frac{A\omega_1 U_m + i_{Lm}(0_-)}{C_m u_{Cm}(0_-) \omega_2} \\ B = \sqrt{(C_m u_{Cm}(0_-) \omega_2)^2 + (A\omega_1 U_m + i_{Lm}(0_-))^2} \end{cases} \quad (10)$$

当双-双同名 IABIIBCG 瞬时性接地故障时, 故障相等效电路如图 4 所示。本文以故障相 IA 为例进行分析, 其他故障相 IBIIBC 与之类似, 故不作分析。

对图 4 所示的双-双同名瞬时性接地故障等效电路作拉普拉斯变换, 可得复频域电路, 如图 5 所示。

根据图 5 所示的电路可列写结点电压方程, 如式(11)所示。

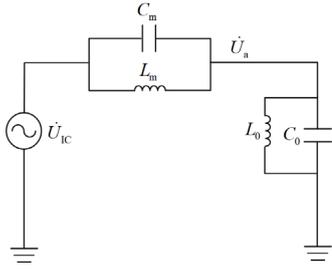


图 4 双-双同名瞬时性接地故障等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of a homonymous dual-to-dual-phase grounding transient fault

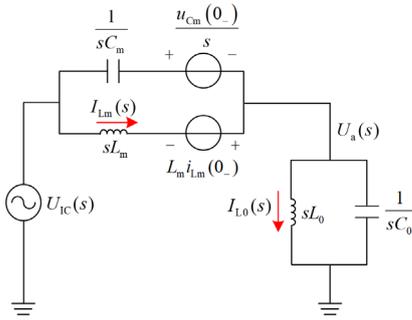


图 5 双-双同名瞬时性接地故障复频域电路

Fig. 5 Complex frequency domain circuit of a homonymous dual-to-dual-phase grounding transient fault

$$\left(sC_m + \frac{1}{sL_m} + sC_0 + \frac{1}{sL_0} \right) U_a(s) - \quad (11)$$

$$\left(sC_m + \frac{1}{sL_m} \right) U_{IC}(s) = \frac{i_{Lm}(0_-)}{s} - C_m u_{Cm}(0_-)$$

故障相 IA 并联电抗器电流为

$$I_{LIA}(s) = I_{L0}(s) - I_{Lm}(s) = \frac{U_a(s)}{sL_0} - \frac{U(s) + L_m i_{Lm}(0_-) - U_{IC}(s)}{sL_m} \quad (12)$$

化简得

$$I_{LIA}(s) = \frac{L_m C_m - L_0 C_0}{L_m L_0 (C_m + C_0)} s \cdot \frac{\omega_1 U_m}{s^2 + \omega_1^2} + \frac{(L_0 + L_m)(-C_m u_{Cm}(0_-) s + i_{Lm}(0_-))}{L_m L_0 (C_m + C_0)} \frac{i_{Lm}(0_-)}{s \left[s^2 + \left(\sqrt{\frac{L_0 + L_m}{L_m L_0 (C_m + C_0)}} \right)^2 \right]} \quad (13)$$

对 $I_{LIA}(s)$ 作拉普拉斯反变换得到

$$\begin{aligned} \dot{I}_{LIA}(t) = & -(i_{Lm}(0_-) + \omega_1 C_m U_m) \cos \omega_2 t + \\ & \omega_1 C_m U_m \cos \omega_1 t - C_m u_{Cm}(0_-) \omega_2 \sin \omega_2 t = \\ & A_1 \cos \omega_1 t - B_1 \sin(\omega_2 t + \beta) \end{aligned} \quad (14)$$

其中:

$$\begin{cases} A_1 = \omega_1 C_m U_m \\ \beta = \arctan \frac{i_{Lm}(0_-) + \omega_1 C_m U_m}{C_m u_{Cm}(0_-) \omega_2} \\ B_1 = \sqrt{(i_{Lm}(0_-) + \omega_1 C_m U_m)^2 + (C_m u_{Cm}(0_-) \omega_2)^2} \end{cases} \quad (15)$$

由上述分析知, 当带并联电抗器的同杆双回输电线路接地故障为瞬时性接地故障时, 根据改进跳闸策略跳闸, 延时后通过重合单端分相开关来增大拍频电流的幅值。根据式(9)和式(14)可知, 故障相并联电抗器电流具有两种频率的周期分量即 ω_1 和 ω_2 , ω_1 为工频分量, ω_2 为自由分量且其大小与线路以及并联器固有参数有关。

2.2 永久性故障时特征分析

在 IAIIBG 发生跨线接地故障后, 根据跳闸策略跳开 IAIIBC, 剩余健全相 IBCIIA 保持准三相运行, 等电弧熄灭以及绝缘恢复后, 合闸非故障相 IIC 的单端分相开关来增大拍频电流的幅值, 进而判定故障性质。当故障一直存在时, 由于对地电容容抗和电感性抗远大于过渡电阻, 因此可近似认为过渡电阻短路了对地电容和对地电感, 单-单不同名永久性接地故障时, 故障相等效电路如图 6 所示。

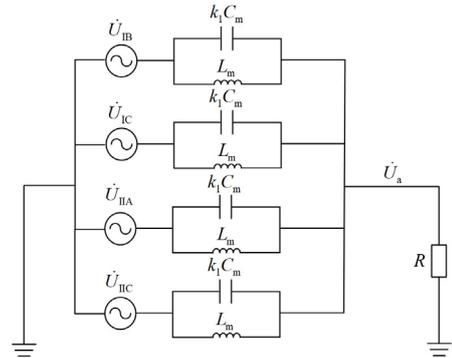


图 6 单-单不同名永久性接地故障等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of a non-homonymous single-to-single-phase grounding permanent fault

对图 6 所示的单-单不同名永久性接地故障等效电路作拉普拉斯变换, 可得永久性接地故障复频域电路, 如图 7 所示。

根据图 7 所示的电路可列写结点电压方程, 如式(16)所示。

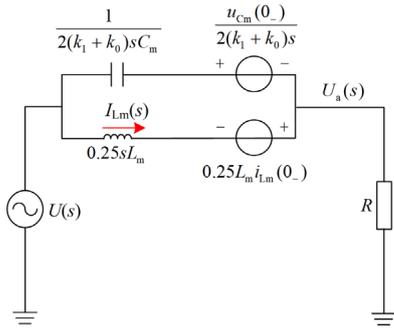


图 7 单-单不同名永久性接地故障复频域电路

Fig. 7 Complex frequency domain circuit of a non-homonymous single-to-single-phase grounding permanent fault

$$\begin{cases} \left(2(k_1+k_0)sC_m + \frac{4}{sL_m} + \frac{1}{R}\right)U_a(s) - \\ \left(2(k_1+k_0)sC_m + \frac{4}{sL_m}\right)U(s) = \frac{i_{Lm}(0_-)}{s} - C_m u_{cm}(0_-) \end{cases} \quad (16)$$

故障相 IA 电压为

$$U_a(s) = \frac{L_m R i_{Lm}(0_-) - L_m C_m R u_{cm}(0_-) s}{2(k_1+k_0)C_m L_m R s^2 + L_m s + 4R} + \frac{2(k_1+k_0)C_m L_m R U(s) s^2 + 4R U(s)}{2(k_1+k_0)C_m L_m R s^2 + L_m s + 4R} \quad (17)$$

故障相 IA 并联电抗器电流为

$$I_{LIA}(s) = -I_{Lm}(s) = -\frac{U(s) + 0.25L_m i_{Lm}(0_-) - U_a(s)}{0.25sL_m} \quad (18)$$

化简得

$$I_{LIA}(s) = -\frac{4U(s) + 4C_m R u_{cm}(0_-) + L_m i_{Lm}(0_-)}{2(k_1+k_0)C_m L_m R s^2 + L_m s + 4R} + \frac{2(k_1+k_0)C_m L_m R i_{Lm}(0_-) s}{2(k_1+k_0)C_m L_m R s^2 + L_m s + 4R} \quad (19)$$

将式(6)代入式(19)作拉普拉斯反变换可得

$$\begin{aligned} \dot{I}_{LIA}(t) = & D \sin(\omega_1 t) + C \cdot \frac{1}{a-b} (e^{at} - e^{bt}) - \\ & i_{Lm}(0_-) \cdot \frac{1}{a-b} \cdot (ae^{at} - be^{bt}) \end{aligned} \quad (20)$$

其中:

$$\begin{cases} C = \frac{1}{L_m} U_m \omega_1 - \frac{4U_m}{2(k_1+k_0)L_m} - \frac{i_{Lm}(0_-)}{2(k_1+k_0)C_m R} \\ D = -\frac{1}{L_m} U_m \\ a = \frac{-L_m + \sqrt{L_m^2 - 32(k_1+k_0)C_m L_m R^2}}{4(k_1+k_0)C_m L_m R} \\ b = \frac{-L_m - \sqrt{L_m^2 - 32(k_1+k_0)C_m L_m R^2}}{4(k_1+k_0)C_m L_m R} \end{cases} \quad (21)$$

双-双同名 IABIIBCG 永久性接地故障时, 故障相等效电路如图 8 所示。本文以故障相 IA 为例进行分析, 其他故障相 IBIBC 与之类似, 故不作分析。

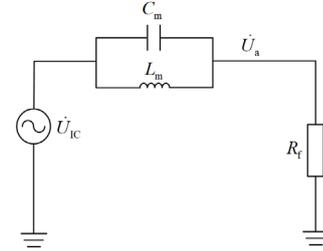


图 8 双-双同名永久性接地故障等效电路

Fig. 8 Equivalent circuit of a homonymous dual-to-dual-phase grounding permanent fault

对图 8 所示的双-双同名永久性接地故障等效电路作拉普拉斯变换, 可得永久性接地故障复频域电路, 如图 9 所示。

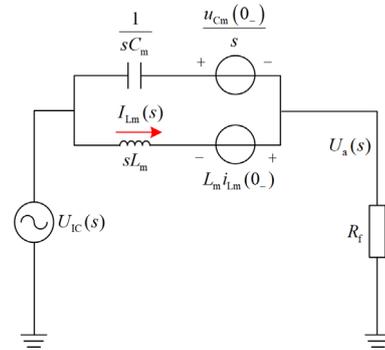


图 9 双-双同名永久性接地故障复频域电路

Fig. 9 Complex frequency domain circuit of a homonymous dual-to-dual-phase grounding permanent fault

根据图 9 所示的电路可列写结点电压方程, 如式(22)所示。

$$\begin{cases} \left(sC_m + \frac{1}{sL_m} + \frac{1}{R_f}\right)U_a(s) - \\ \left(sC_m + \frac{1}{sL_m}\right)U_{IC}(s) = \frac{i_{Lm}(0_-)}{s} - C_m u_{cm}(0_-) \end{cases} \quad (22)$$

故障相 IA 并联电抗器电流为

$$I_{LIA}(s) = -I_{Lm}(s) = -\frac{U_{IC}(s) + L_m i_{Lm}(0_-) - U_a(s)}{sL_m} \quad (23)$$

化简得

$$I_{LIA}(s) = -\frac{\omega_1 U_m}{s^2 + \omega_1^2} + \frac{R_f C_m u_{cm}(0_-)}{s^2 R_f L_m C_m + sL_m + R_f} - \frac{L_m i_{Lm}(0_-) + sR_f L_m C_m i_{Lm}(0_-)}{s^2 R_f L_m C_m + sL_m + R_f} \quad (24)$$

对 $I_{LIA}(s)$ 作拉普拉斯反变换可得

$$\dot{I}_{LIA}(t) = C_1 \cos(\omega_1 t) + D_1 \cdot \frac{1}{a_1 - b_1} \cdot (a_1 e^{a_1 t} - b_1 e^{b_1 t}) + E_1 \frac{1}{a_1 - b_1} (e^{a_1 t} - e^{b_1 t}) \quad (25)$$

其中:

$$\begin{cases} C_1 = -\frac{U_m}{L_m \omega_1} \\ D_1 = \frac{U_m C_m R}{\omega_1} - L_m C_m R i_{Lm}(0_-) \\ E_1 = \frac{U_m}{\omega_1} - L_m i_{Lm}(0_-) - C_m R u_{Cm}(0_-) \\ a_1 = \frac{-L_m + \sqrt{L_m^2 - 4C_m L_m R^2}}{2C_m L_m R} \\ b_1 = \frac{-L_m - \sqrt{L_m^2 - 4C_m L_m R^2}}{2C_m L_m R} \end{cases} \quad (26)$$

由上述分析知, 当带并联电抗器的同杆双回输电线路接地故障为永久性接地故障时, 根据式(20)和式(25)可知, 故障相并联电抗器电流有工频分量和直流衰减量, 当线路中的能量经接地点释放时, 呈现直流衰减趋势, 其衰减速度与等效相间电感、相间电容以及接地过渡电阻有关。

其他接地故障特征分析与之类似, 限于篇幅故不再赘述。

3 故障性质判据

由第2节分析可得, 在同杆双回输电线路发生故障时, 并联电抗器中的电流成分只与瞬时性故障和永久性故障有关系。即在瞬时性接地故障时, 故障相并联电抗器电流为工频分量与自由分量的两种频率的叠加; 而在永久性接地故障时, 其故障相并联电抗器电流由工频分量与直流分量构成, 直流分量采用差分滤波器滤除。本文以最复杂的单-单不同名 IAIBG 接地故障为例提出故障性质判据, 瞬时性和永久性故障相并联电抗器电流 $\dot{I}_{Li}(t)$ 、 $\dot{I}_{Lp}(t)$ 表达式分别为

$$\dot{I}_{Li}(t) = A\omega_1 U_m \cos \omega_1 t - B \sin(\omega_2 t + \alpha) \quad (27)$$

$$\dot{I}_{Lp}(t) = D \sin(\omega_1 t) \quad (28)$$

根据瞬时性接地故障时 $\dot{I}_{Li}(t)$ 有工频分量 ω_1 和自由分量 ω_2 , 而永久性接地故障时故障相并联电抗器电流 $\dot{I}_{Lp}(t)$ 仅有工频分量 ω_1 , 为此本文提出一种微分栅的方法分析工频分量 ω_1 。

$$\dot{I}_{Ldg}(t) = \frac{\dot{I}_{Li}''(t)}{\omega_1} + \omega_1 \dot{I}_{Li}(t) \quad (29)$$

式中: $\dot{I}_{Ldg}(t)$ 为故障相并联电抗器微分栅电流; $\dot{I}_{Li}''(t)$ 为故障相并联电抗器电流 $\dot{I}_{Li}(t)$ 的二阶微分, 电流的二阶微分可通过中心差分法求取。

因此, 发生瞬时性和永久性接地故障时, 故障相并联电抗器微分栅电流可分别表示为

$$\dot{I}_{Ldgt}(t) = B \left(\frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega_1} \right) \sin(\omega_2 t + \alpha) \quad (30)$$

$$\dot{I}_{Ldgp}(t) = 0 \quad (31)$$

由式(30)和式(31)可知, 带并抗的同杆双回输电线路瞬时性接地故障时, 故障相并联电抗器微分栅电流幅值为 $B(\omega_2^2 - \omega_1^2)/\omega_1$, 而永久性接地故障时, 故障相并联电抗器微分栅电流为 0。

由于并联电抗器等效电感中的电流不能发生突变^[25], 则熄弧后并联电抗器等效相间电感的电流初始值 $i_{Lm}(0_-)$ 为

$$i_{Lm}(0_-) = \frac{\alpha_1 U_{xL} \sin(\beta_1 - \theta)}{\omega_1 L_m} \quad (32)$$

式中: α_1 为故障点到保护安装处的距离占线路全长的百分比; β_1 为互阻抗的阻抗角; θ 为功率因素角; U_{xL} 为电磁耦合电压幅值。

当故障发生在线路首端时, $i_{Lm}(0_-) = 0$, 且自由分量幅值最小, 定义自由分量为 $\dot{I}_1(t)$, 其表达式为

$$\begin{cases} \dot{I}_1(t) = -\sqrt{(C_m u_{Cm}(0_-) \omega_2)^2 + (A\omega_1 U_m)^2} \sin(\omega_2 t + \alpha) \\ \alpha = \arctan \frac{A\omega_1 U_m}{C_m u_{Cm}(0_-) \omega_2} \end{cases} \quad (33)$$

由上式得 $|\dot{I}_1(t)| > A\omega_1 U_m$, 即 $B > A\omega_1 U_m$, 因此瞬时性接地故障时故障相并联电抗器微分栅电流的最小幅值为

$$I_{Ldgt.min} = |AU_m(\omega_2^2 - \omega_1^2)| \quad (34)$$

同杆双回输电线路发生接地故障时, 根据改进跳闸策略跳开相应相, 待电弧熄灭以及绝缘恢复后合闸非故障相单端分相开关, 增大故障相并联电抗器拍频电流的幅值。其次通过分析同杆双回输电线路发生瞬时性和永久性接地故障时, 故障相并联电抗器电流特征存在显著差异, 提出基于故障相并联电抗器电流经微分栅法析出工频分量的故障性质判据, 其表达式为

$$I_{LdgRMS} > I_{set} \quad (35)$$

式中: I_{LdgRMS} 为故障相并联电抗器微分栅电流的有效值; I_{set} 为整定门槛值。

虑及故障相并联电抗器电流上升时间、滤波以及微分栅法过程造成的时延, 延迟 0.1 s 后, 若式(35)

在 0.02 s 内持续成立, 则判定同杆双回输电线路接地故障为瞬时性, 否则表明永久性故障或者瞬时性故障多次发生。

$$I_{\text{set}} = K_1 I_{\text{LdgtRMS.min}} \quad (36)$$

式中: $I_{\text{LdgtRMS.min}}$ 为瞬时性接地故障时故障相并联电抗器微分栅电流的最小有效值; K_1 为裕度系数, 考虑到双-双同名接地故障和单-双不同名接地故障对故障相并联电抗器电流存在略微差异, 因此本文取 0.5。

4 自适应重合闸策略

带并联电抗器的同杆双回输电线路接地故障采用传统跳闸策略时会给系统注入负序分量; 基于二次电弧阶段的熄弧判据不仅要有准确的电弧模型, 而且对暂态信号的采集和数据处理有很高的要求; 准三相运行时故障相并联电抗器拍频电流的幅值过小, 很难判定故障性质。针对上述问题, 提出了基于故障相并联电抗器微分栅电流的故障性质判据, 进而提出采用重合单端分相开关的带并抗同杆双回输电线路接地故障自适应重合闸策略, 如图 10 所示。

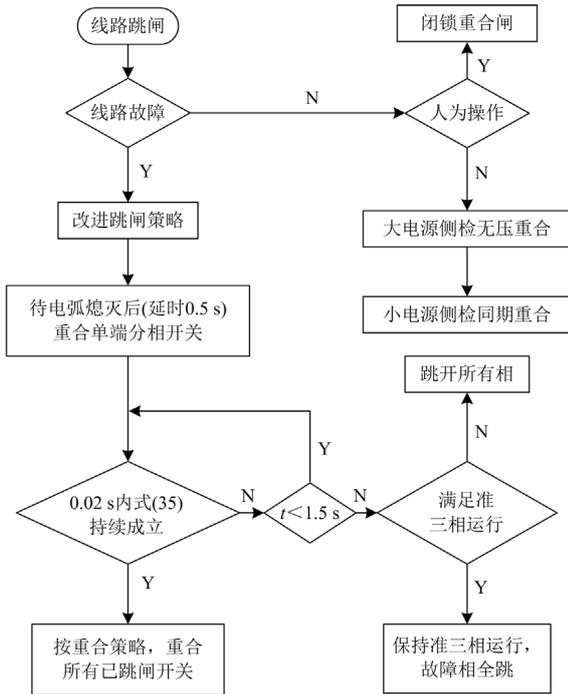


图 10 自适应重合闸策略流程图

Fig. 10 Flow chart of adaptive autoreclosing strategy

1) 判定线路跳闸原因, 若为人为操作则闭锁重合闸; 若为开关偷跳则大电源侧检无压重合, 小电源侧检同期重合; 否则则认为线路发生故障。

2) 当同杆双回输电线路发生接地故障时, 根据

改进跳闸策略跳开相应断路器, 计时器归 0, 开始计时。虑及故障熄弧时间以及绝缘恢复情况, 延时 0.5 s^[26]后重合非故障相单端分相开关为故障性质判定奠定基础。

3) 考虑到故障相电流上升时间以及微分栅电流处理过程造成的时延, 延时 0.1 s 后判定故障性质。当所有故障相并联电抗器微分栅电流在 0.02 s 内持续满足式(35)时, 认为故障相为瞬时性故障即故障已消失, 线路可合闸; 当故障相在最大重合时间 1.5 s^[10]内不满足式(35)时, 认为故障相为永久性故障或者瞬时性故障持续时间较长。若满足准三相运行则准三相运行, 若不满足线路全部跳开, 并闭锁重合闸等待检修人员检修。

5 仿真结果与分析

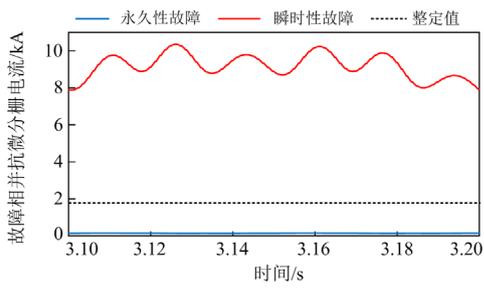
本文参照某实际同杆双回输电线路, 电压等级为 500 kV, 线路长度为 180 km, 线路单位长度参数如下^[1]: 正序阻抗 $Z_1 = (0.02149 + j0.27914) \Omega/\text{km}$; 正序电容 $C_1 = 0.01404 \mu\text{F}/\text{km}$; 零序阻抗 $Z_0 = (0.1534 + j0.9619) \Omega/\text{km}$; 零序电容 $C_0 = 0.00843 \mu\text{F}/\text{km}$; 并联电抗器每相 $X = 2083 \Omega$; 中性点小电抗器 $X_n = 600 \Omega$ 。基于 PSACD/EMTDC 平台搭建其分布参数模型, 验证所提出自适应重合闸策略的正确性。

基于本文所提基于故障相并联电抗器微分栅电流的故障性质判据、线路参数以及式(34)、式(36), 求得带并抗的同杆双回输电线路发生瞬时性接地故障时自由分量的角频率为 247 rad/s, 故障相并联电抗器微分栅电流最小幅值的有效值为 3887 A, 则故障相并联电抗器电流整定门槛值为 1943 A。

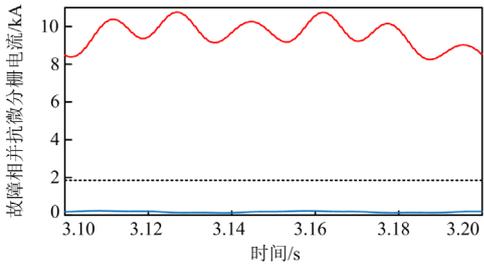
5.1 故障性质判据仿真

以带并联电抗器的同杆双回输电线路发生单-单不同名 IAIBG、双-双同名 IABIIBCG 跨线接地故障和单相接地 IAG 为例进行仿真验证。故障位置分别为线路首端、线路中点和线路末端; 过渡电阻分别为 0 Ω 和 500 Ω 。假设单-单不同名 IAIBG 发生接地故障时间为 2.5 s 时刻, 根据改进跳闸策略跳开 IAIBC, IBCIIA 保持准三相运行, 待电弧熄灭以及绝缘恢复后合闸单端分相开关 IC; 同理单相接地 IAG 发生接地故障时间为 2.5 s 时刻, 根据改进跳闸策略跳开 IABC, IIABC 保持准三相运行, 待电弧熄灭以及绝缘恢复后合闸单端分相开关 IC, 各故障相仿真结果见图 11—图 16。

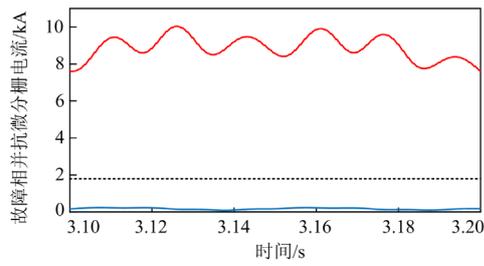
其他跨线接地故障仿真验证与上述 3 种情况类似, 本文不再详细分析。



(a) 首端故障



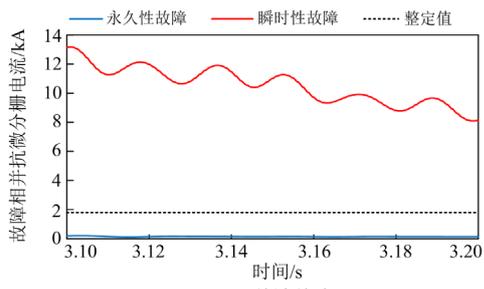
(b) 中端故障



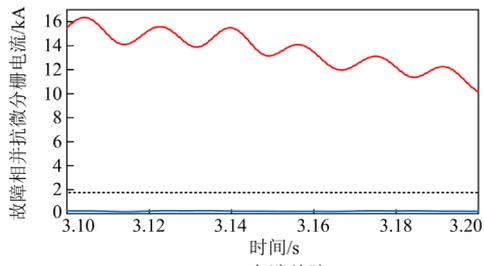
(c) 末端故障

图 11 过渡电阻为 0Ω , IAIBG 故障 IA 相并抗微分栅电流

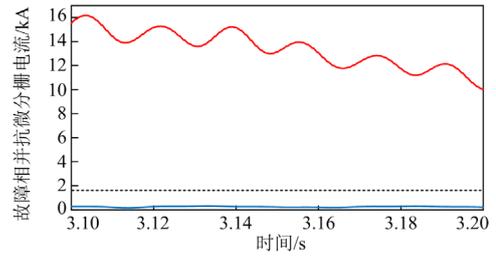
Fig. 11 Shunt reactor differential grid current of the phase IA in an IAIBG fault case when transition resistance is 0Ω



(a) 首端故障



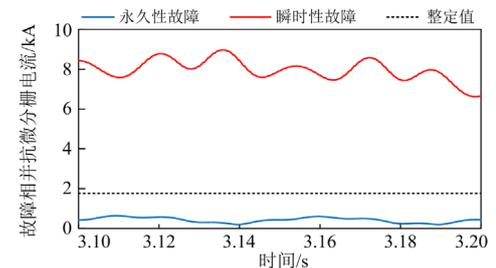
(b) 中端故障



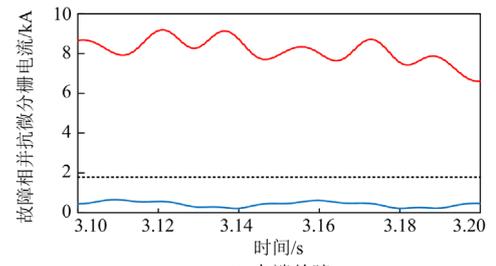
(c) 末端故障

图 12 过渡电阻为 0Ω , IAIBG 故障 IB 相并抗微分栅电流

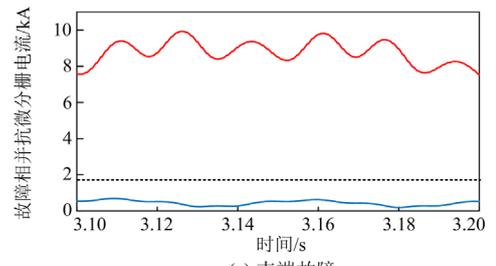
Fig. 12 Shunt reactor differential grid current of the phase IB in an IAIBG fault case when transition resistance is 0Ω



(a) 首端故障



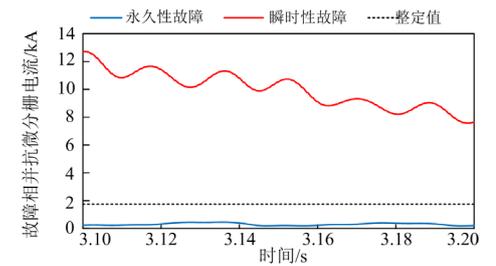
(b) 中端故障



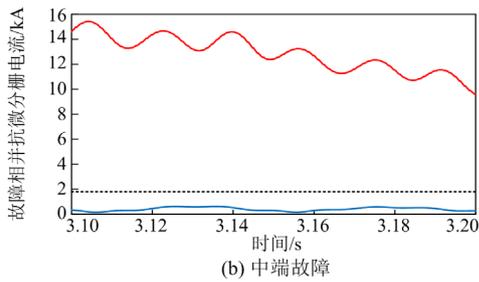
(c) 末端故障

图 13 过渡电阻为 500Ω , IAIBG 故障 IA 相并抗微分栅电流

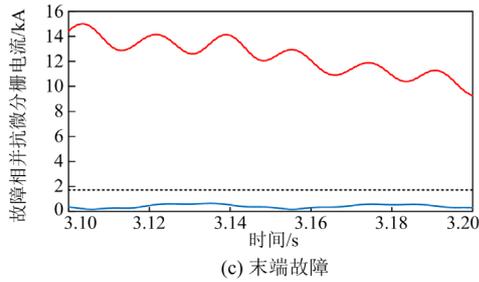
Fig. 13 Shunt reactor differential grid current of the phase IA in an IAIBG fault case when transition resistance is 500Ω



(a) 首端故障

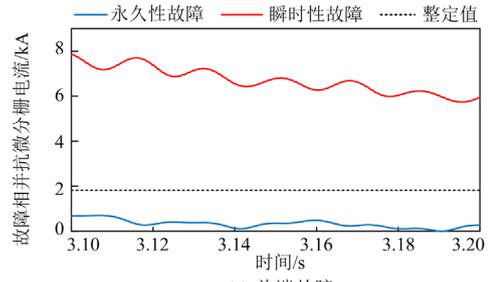


(b) 中端故障

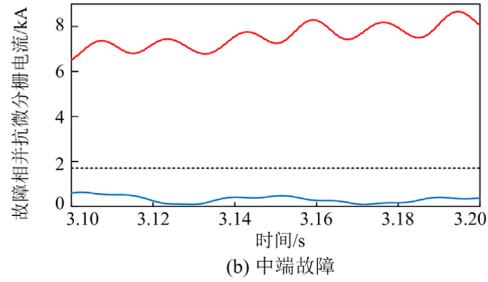


(c) 末端故障

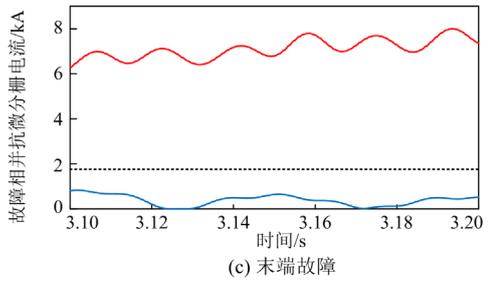
图 14 过渡电阻为 500 Ω, IAIIBG 故障 IIB 相并联抗微分栅电流
Fig. 14 Shunt reactor differential grid current of the phase IB in an IAIIBG fault case when transition resistance is 500 Ω



(a) 首端故障

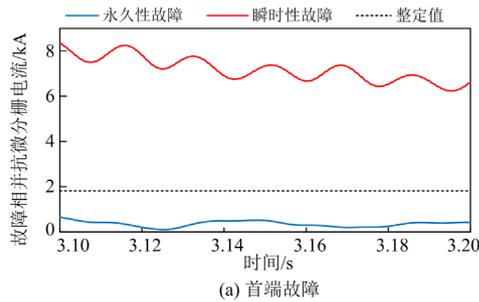


(b) 中端故障

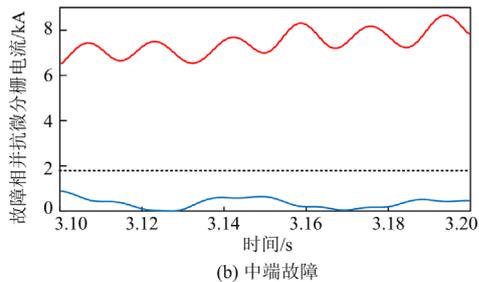


(c) 末端故障

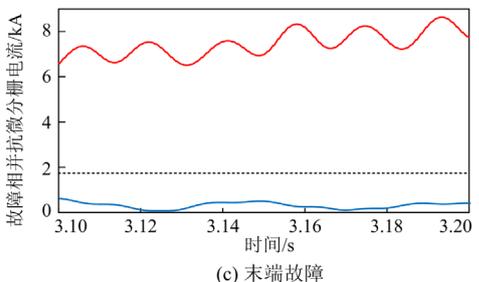
图 16 过渡电阻为 500 Ω, IAG 故障 IA 相并联抗微分栅电流
Fig. 16 Shunt reactor differential grid current of the phase IA in an IAG fault case when transition resistance is 500 Ω



(a) 首端故障



(b) 中端故障



(c) 末端故障

图 15 过渡电阻为 0 Ω, IAG 故障 IA 相并联抗微分栅电流
Fig. 15 Shunt reactor differential grid current of the phase IA in an IAG fault case when transition resistance is 0 Ω

由图 11—图 16 可以看出:

1) 当故障相并联电抗器微分栅电流超过整定值并维持 0.02 s 时, 故障相为瞬时性故障; 当故障相并联电抗器微分栅电流接近 0 时, 故障相为永久性故障。此判据简单、可靠并且能够准确判定故障性质。

2) 本文所提基于故障相并联电抗器微分栅电流的故障性质判据不受故障位置、过渡电阻的影响。不论接地故障发生在线路首端、中端或者末端, 以及其过渡电阻的大小和故障持续时间的长短, 都能准确快速判断故障性质, 为带并抗的同杆双回线接地故障相自适应重合闸策略提供依据。

3) 带并抗的同杆双回线发生其他接地故障与 IAIIBG 接地故障的仿真图形类似, 限于篇幅, 本文不再详细分析。

5.2 自适应重合闸策略仿真

当线路 2.5 s 时发生 IAIIBG 接地故障, 根据跳闸策略跳开 IAIIBC 相断路器, IBCIA 保持准三相

运行,待电弧熄灭以及绝缘恢复后($t = 3\text{ s}$)合闸 IIC 相单端分相开关, $t = 3.1\text{ s}$ 时判断 0.02 s 内是否持续满足式(35),若满足,判定为瞬时性故障, 3.2 s 时大电源侧 IA IIB 检无压重合, 3.25 s 时小电源侧 IA IIB C 检同期重合;若在最大重合时间 1.5 s 内不满足式(35),则判定为永久性故障闭锁重合闸。跳开相恢复供电后的相电压与相电流波形如图 17 所示。

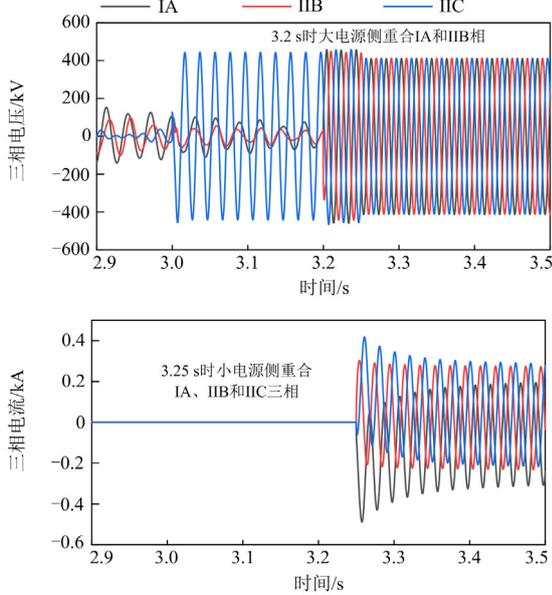


图 17 瞬时性故障后重合所有已跳闸相的电压与电流

Fig. 17 Voltage and current waveforms for reclosing all tripped phases after a transient fault

由图 17 可以看出:

1) 带并联电抗器的同杆双回输电线路发生瞬时性接地故障后,合闸跳开相后线路电压快速恢复至额定值,在合闸时会产生冲击电流,但不会超过最大允许值;

2) 仿真验证了本文所提改进跳闸策略以及适用于带并抗的同杆双回输电线路分相自适应策略能够保证在瞬时性故障时线路尽快恢复供电,有利于系统稳定性。

6 结论

自动重合闸若重合于永久性故障会给输电网带来二次冲击;传统同杆双回输电线路自适应重合闸可能会给系统注入负序分量;基于二次电弧阶段的熄弧判据不仅有准确的电弧模型,而且对暂态信号的采集和数据处理有很高的要求。针对上述问题,本文提出了适用于带并抗的同杆双回线接地故障改进跳闸与分相自适应重合闸策略。

1) 针对故障种类繁多的同杆双回输电线路,提出了能够避免负序分量注入系统的改进跳闸策略,

延时后合闸非故障相单端分相开关为故障性质判据奠定了基础。

2) 通过分析瞬时性和永久性接地故障情况下的故障相并联电抗器电流存在显著差异,提出了基于故障相并联电抗器电流经微分栅法析出工频分量的故障性质判据,经仿真验证,该判据适用于多种接地故障类型、不受过渡电阻、故障位置以及故障持续时间的影响,能够快速、准确地判断故障性质。

3) 本文所提分相自适应重合闸策略仅研究接地故障,未考虑不接地故障;其次当同杆双回输电线路发生单-单同名相 IA IIB C 这类跨线接地故障时,线路会全部跳闸再进行故障性质判定;此策略仅经过仿真实验验证,还未经过实物验证。

附录 A

单端带并联电抗器的同杆双回输电线路的等效模型如图 A1 所示,图中: $\dot{E}_{M\varphi}$ 为 M 端电动势; $\dot{E}_{N\varphi}$ 为 N 端电动势; φ 表示 A、B、C 三相; C_0 为对地电容。考虑到线路自阻抗远小于输电线路容抗以及感抗,为简化计算,故在分析过程中忽略线路自阻抗。而在实际工程中,同杆双回输电线路回间距离比相间距离较大,可近似认为每回相间电容为 $k_0 C_m$, 线间电容为 $k_1 C_m$, 其中 $k_0 = 1$ 、 $k_1 = 0.8$ 。

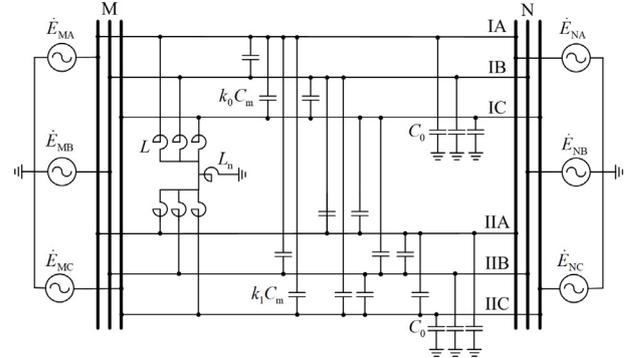


图 A1 带并联电抗器的同杆双回线等效模型

Fig. A1 Equivalent modeling of the double-circuit transmission lines with shunt reactors

并联电抗器等效变换如下:同杆双回线并联电抗器共同中性点连接电路如图 A2 所示,等效模型电路图如图 A3 所示。将图 A2 电路图等效为图 A3,其实质是将星型电路图等效为网型的过程。

并联电抗器每一相电感 L 以及共同中性点小电抗的电感 L_n 通过星网变换为相间电感 L_m 和对地电感 L_0 。星网变换公式^[27]为

$$\begin{cases} L_m = L / L_n (L + 6L_n) \\ L_0 = L + 6L_n \end{cases}$$

式中, L_m 和 L_0 分别为并联电抗器共同中性点连接方式经星网变换后的相间等效电感和对地等效电感。

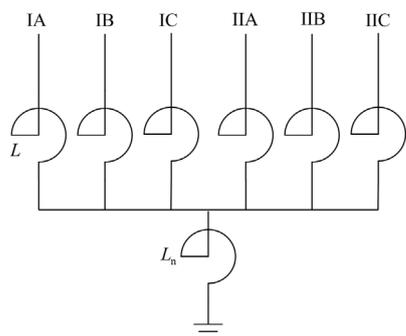


图 A2 同杆双回线并联电抗器共同中性点方式
Fig. A2 Common neutral mode of shunt reactor on double-circuit transmission lines

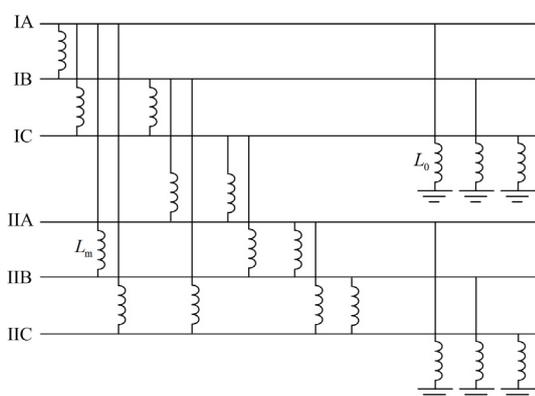


图 A3 同杆双回线并联电抗器共同中性点方式等效模型
Fig. A3 Equivalent model of common neutral point approach for shunt reactor with the double-circuit transmission lines

参考文献

- [1] 李博通, 李永丽. 基于故障点电压特性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.
- [2] 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.
- [3] NING J X, HE B N, WANG Z Z, 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.
- [4] 李浩, 宋国兵, 樊艳芳, 等. 利用分相开关探测的配电网永久性故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 11-21.
- [5] LI Hao, SONG Guobing, FAN Yanfang, et al. Permanent fault identification method of a distribution network based on detection using a phase segregated switch[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 11-21.
- [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] 李振兴, 张萌萌, 万佳灵, 等. 紧急功率支援下自适应重合闸附加稳定控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 78-87.
- [8] LI Zhenxing, ZHANG Mengmeng, WAN Jialing, et al. Adaptive reclosure additional stability control strategy with emergency power support[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 78-87.
- [9] 高凯, 屈海涛, 任茂鑫, 等. 基于可控电压源的高压直流输电换相失败抑制技术[J]. 高压电器, 2023, 59(1): 49-57.
- [10] GAO Kai, QU Haitao, REN Maoxin, et al. Commutation failure suppression technology for HVDC transmission based on controlled voltage source[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1): 49-57.
- [11] 曾亮, 李永丽, 张云柯, 等. 逆变侧交流系统不对称故障引发 HVDC 系统连续换相失败的机理及抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3159-3168.
- [12] ZENG Liang, LI Yongli, ZHANG Yunke, et al. Research on mechanism and control strategy of continuous commutation failures in HVDC system caused by asymmetrical fault in inverter-side AC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3159-3168.
- [13] 邹耀, 陈卫, 李世龙, 等. 同杆双回线准三相运行与跳合闸策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 137-142.
- [14] ZOU Yao, CHEN Wei, LI Shilong, et al. Quasithree phase operation and tripping and reclosing strategy of double circuit transmission lines on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 137-142.
- [15] 周伟绩, 李凤婷, 解超. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 33-41.
- [16] ZHOU Weiji, LI Fengting, XIE Chao. Adaptive autoreclosing scheme for line-to-line grounded faults on double-circuit transmission lines with shunt reactors[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 33-41.
- [17] 汤奕, 郑晨一. 高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 499-513.
- [18] TANG Yi, ZHENG Chenyi. Review on influencing factors of commutation failure in HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 499-513.
- [19] 刘浩芳, 王增平, 刘峻岭. 带并补的超高压输电线路单相自适应重合闸新判据[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 62-66.
- [20] LIU Haofang, WANG Zengping, LIU Junling. A new criterion for single-phase adaptive reclosure of shunt reactor

- compensated EHV transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 62-66.
- [13] 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.
- [14] 索南加乐, 宋国兵, 邵文权, 等. 两端带并联电抗器输电线路永久性故障判别[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 56-60.
SUONAN Jiale, SONG Guobing, SHAO Wenquan, et al. Identification of permanent faults based on differential current protection for transmission lines with two shunt reactors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 56-60.
- [15] 廖宏宇, 康小宁, 袁燕磊, 等. 利用注入信号的配电网自适应三相重合闸研究[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2623-2630.
LIAO Hongyu, KANG Xiaoning, YUAN Yanlei, et al. Adaptive three-phase reclosing device of distribution network based on injected signals[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2623-2630.
- [16] 解超, 李凤婷, 樊艳芳, 等. 应用附加电容器的不带并联电抗器输电线路自适应三相重合闸策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1811-1818.
XIE Chao, LI Fengting, FAN Yanfang, et al. Adaptive three-phase reclosing scheme of transmission lines without shunt reactors using additional capacitors[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1811-1818.
- [17] 解超, 李凤婷, 路亮, 等. 不带并联电抗器的风电场单回送出线自适应三相重合闸策略[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3492-3500.
XIE Chao, LI Fengting, LU Liang, et al. An adaptive three-phase reclosing scheme for wind farm single circuit outgoing line without shunt reactors[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3492-3500.
- [18] 张志华, 刘健, 吴水兰, 等. 基于暂态特征的配电线路自适应重合闸仿真研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(7): 81-88.
ZHANG Zhihua, LIU Jian, WU Shuilan, et al. Research on simulation of distribution line adaptive auto-reclosure technique based on the transient characteristic[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(7): 81-88.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 宋金钊, 李永丽, 张云柯, 等. 逆变侧交流线路单相自适应重合闸的适用性分析与改进策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 1001-1010.
SONG Jinzhao, LI Yongli, ZHANG Yunke, et al. Applicability analysis and improved strategy of adaptive single-phase reclosure for AC lines on inverter side[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1001-1010.
- [25] 曹芬. 高压输电线路自适应重合闸技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
CAO Fen. Research on adaptive reclosing technique for HV transmission lines[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [26] 刘培, 杨军, 陶丁涛. 一种输电线路瞬时故障最佳重合闸时刻实用计算方法[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 635-640.
LIU Pei, YANG Jun, TAO Dingtao. Practical online calculation of optimal reclosing time for transmission line under transient fault[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 635-640.
- [27] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.

收稿日期: 2023-07-22; 修回日期: 2023-12-05

作者简介:

蒋江波(1995—), 男, 硕士研究生, 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: 1253272719@qq.com

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

(编辑 姜新丽)