

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.236141

计及故障点两侧零序电流相位差的新能源送出线路 接地故障时域距离保护研究

叶远波¹, 王吉文¹, 汪胜和¹, 章若竹², 刘森², 郑涛², 苏毅²

(1. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022; 2. 北京四方继保工程技术有限公司, 北京 100085)

摘要: 新能源电源故障电流呈现弱馈性、强受控性并具有大量的间谐波, 导致现有工频量距离保护可靠性下降, 而时域距离保护主要根据方程求解故障距离, 受新能源短路电流特性影响较小。针对新能源送出线路较长时, 线路分布电容对零序电流相位的影响不可忽略, 进而导致故障距离的计算产生较大偏差的问题, 提出了一种计及故障点两侧零序电流相位差的新能源送出线路时域距离保护改进方案。首先, 计及故障点两侧零序电流相位差的影响, 将过渡电阻等效为过渡阻抗。然后, 通过列写故障回路方程并求解故障距离, 形成保护判据。最后, 基于PSCAD/EMTDC大量仿真实验, 验证了所提时域距离保护方案计算故障距离的误差较小, 可以较好地适用于新能源经中长距离交流线路送出的场景。

关键词: 新能源送出线; 时域距离保护; 过渡电阻; 零序电流; 相位偏差

Time domain distance protection of new energy transmission line grounding fault considering the phase difference of zero sequence current on both sides of the fault point

YE Yuanbo¹, WANG Jiwen¹, WANG Shenghe¹, ZHANG Ruozhu², LIU Sen², ZHENG Tao², SU Yi²

(1. State Grid Anhui Electric Power Limited Company, Hefei 230022, China;

2. Beijing Sifang Engineering Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: The fault current in new energy power supply presents weak feedback, strong controllability and a large number of interharmonics. This leads to decline in the reliability of existing power frequency distance protection. Time-domain distance protection mainly establishes the fault distance based on the equation, and is less affected by the short-circuit current characteristics of new energy. This paper proposes an improved time domain distance protection scheme for new energy transmission lines that takes into account the phase difference of zero sequence current on both sides of the fault point. This is to address the issue of significant deviation in the calculation of fault distance caused by the influence of distributed capacitance on the phase of zero sequence current when the new energy transmission line is long. First, taking into account the influence of the phase difference of the zero sequence current on both sides of the fault point, the transition resistance is equivalent to the transition impedance. Then, by writing the fault circuit equation and finding the fault distance, a protection criterion is formed. Finally, based on a large number of simulation experiments using PSCAD/EMTDC, it is verified that the time-domain distance protection scheme proposed in this paper has only a small error in calculating the fault distance, and can be well applied to scenarios where new energy is transmitted through medium to long distance AC lines.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2401004).

Key words: new energy transmission line; time domain distance protection; transition resistance; zero sequence current; current phase difference

0 引言

近年来, 在双碳目标引领下我国向着清洁、智

能的方向加速建设新一代电力系统。构建以新能源为主体的新型电力系统成为目前解决环境问题的重要举措之一^[1]。随着大量电力电子装置的接入, 新能源短路电流呈现出幅值受限、相角受控的故障特性^[2-3], 传统继电保护面临着严峻的挑战, 因此亟需

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2401004)

一种适应于新能源送出线路的继电保护新方案。

我国地域广阔, 新能源电源大多安装在风能、太阳能丰富的边远地区, 电力需要跨区输送, 因此新能源送出线路通常电压等级较高、输电线路较长。距离保护作为线路保护的重要组成部分之一, 被广泛用于 220 kV 及以上电压等级输电线路的后备保护^[4]。然而由于新能源电源的正、负序阻抗是实时变化的, 导致工频量距离保护在新能源送出线路发生单相接地故障时存在区内拒动等一系列问题^[5-7], 无法适用于新能源送出线路, 因此可以采用不受新能源短路电流谐波分量影响的时域距离保护方案^[8-10]。针对新能源送出线路发生单相接地故障的时域距离保护方案, 国内外学者开展了大量的研究工作, 已经取得了一定的研究成果^[11-15]。文献[11]针对新能源送出线路建立时域等效模型, 提出了基于解微分方程思想的保护算法, 但是未考虑单相接地故障过渡电阻对保护的影响。文献[12]基于 R-L 模型, 提出了一种适应于风电接入系统的时域距离保护策略, 增加过渡电阻为待识别量, 提高了计算的精度; 文献[13]在考虑过渡电阻影响的基础上, 将故障点后的系统等效为一个电感, 提出了一种基于参数识别的高阻接地距离保护算法, 显著降低了过渡电阻的影响, 提高了保护可靠性, 但是当线路首端附近故障时, 测距方程计算故障距离偏大。文献[14]采用低通滤波器滤除采样电压、电流中的高频分量, 消除了线路分布电容对保护算法的影响, 但为得到较好的滤波效果通常需要较长的数据窗, 此方案难以满足继电保护速动性的要求。文献[15]提出了一种不受频率影响且具有抗过渡电阻能力的时域距离保护方法, 但方案引入了对端系统参数。同时, 当输电线路较长时, 其保护性能仍然受到影响。但上述文献均未计及中长距离送出线路分布电容导致故障点两侧零序电流相位不一致的问题, 在中长距离送出线路中仍存在一定的算法误差。

综上所述, 针对中长距离新能源送出线路发生单相接地故障的场景, 线路分布电容会对故障点两侧零序电流的相位产生影响, 而现有的时域距离保护方案均使用新能源侧保护安装处的零序电流直接等效故障点电流, 未考虑故障点与保护安装处零序电流存在相位偏差的问题, 导致保护算法误差较大。为解决这一问题, 本文以中长距离新能源送出线路发生单相接地故障为背景, 提出了一种计及故障点两侧零序电流相位差的时域距离保护新方案。该方案首先基于 R-L 模型等效新能源送出线路, 计及故障点两侧零序电流相位差的影响, 将过渡电阻拆分为过渡电阻和过渡电感的形式; 进而推导故障回路

方程, 根据新能源侧保护安装处的电压、电流时域信息求解故障距离, 并构造保护判据; 最后, 基于 PSCAD/EMTP 仿真平台实验, 通过与现有时域距离保护方案的对比, 验证了本文所提保护方案能准确提供故障位置信息, 适用于中长距离新能源送出线路。

1 距离保护在新能源送出线路中的适应性分析

1.1 工频量距离保护在新能源送出线路中的适应性分析

工频量距离保护通过提取故障暂态阶段保护安装处电压、电流的工频分量, 计算测量阻抗的大小^[16-17]。并将测量阻抗 Z_m 与整定阻抗 Z_{set} 相比较, 若满足 $Z_m < Z_{set}$, 则保护动作; 反之则保护不应动作。

工频量距离保护较适用于双端交流系统输电线路, 其可靠性较高。但由于新能源短路电流中含有大量谐波分量, 而工频量距离保护需要利用傅里叶算法提取电压、电流的工频量信息求解测量阻抗, 其中大量的谐波分量会导致傅里叶算法存在较大误差^[18-19], 因此工频量距离保护不适用于新能源送出线路。

1.2 时域距离保护在新能源送出线路中的适应性分析

1.2.1 时域距离保护原理

时域距离保护利用 R-L 模型构造故障回路方程, 并求解故障距离^[20], 单相接地故障下的等效电路图如图 1 所示。

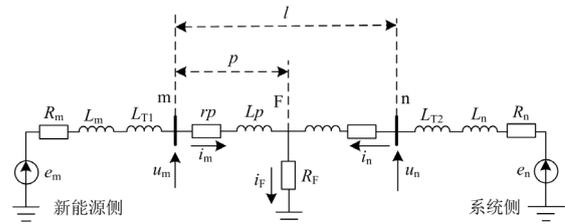


图 1 单相接地故障下等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram under single-phase ground fault

图 1 中: u_m 、 i_m 、 u_n 、 i_n 分别为故障时新能源侧及系统侧保护安装处的电压及电流; i_f 为故障点电流; R_m 、 L_m 、 R_n 、 L_n 分别为新能源侧及对侧系统的等效电阻与电感; L_{T1} 、 L_{T2} 分别为新能源侧及对侧系统的变压器等效阻抗; R_f 为故障时的过渡电阻; p 、 l 分别为新能源侧保护安装处到故障点的距离以及送出线路的总长度; r 、 L 分别为单位长度线路的电阻与电感值。

由于新能源送出线路发生单相接地故障时往往伴随着较大的过渡电阻^[21-23], 因此时域距离保护计

及过渡电阻的影响, 当 F 点发生单相接地故障时, 故障回路方程为

$$u_m = r p i_m + L p \frac{d i_m}{d t} + i_f R_F \quad (1)$$

式中, t 为故障发生的时间。

由于故障点电流 i_f 无法测量, 故需要对其进行等效处理。对于新能源送出线路较短的情况, 由于线路分布电容的影响可以忽略, 故可以认为故障点两侧的零序网络阻抗角近似相等, 则流过线路两侧的零序电流近似同相位, 因此 $3i_{m0}$ 与 i_f 之间只差一个系数 N_1 , 令 $R'_F = N_1 R_F$, 故可得故障回路方程为

$$u_m = r p i_m + L p \frac{d i_m}{d t} + 3 i_{m0} R'_F \quad (2)$$

式中: i_{m0} 为新能源侧保护安装处的零序电流, 由零模变换求得; R'_F 为等效过渡电阻。

对式(2)进行离散化处理, 利用差分代替微分求解故障距离, 并用最小二乘法对计算得到的故障距离进行拟合。将经过拟合后的计算故障距离 p_f 与整定距离 p_{set} 进行比较, 若满足 $p_f < p_{set}$, 则保护动作, 反之则保护不动作。

1.2.2 在新能源送出线路中的适应性分析

基于上述分析, 时域距离保护仅适应于新能源送出线路距离较短的情况, 而对于中长距离输电线路, 由于线路分布电容较大, 其影响不可忽略。图 2 为考虑线路分布电容的零序等效电路图, 图中: r_0 、 L_0 及 c_0 分别为单位长度线路的零序电阻、电感与电容值; L_{mT0} 、 L_{nT0} 分别为新能源侧及对侧系统变压器的零序阻抗。 $i_f = 3i_{F0} = 3(i_{m0} + i_{n0} - i_{mc10} - i_{mc20} - i_{nc10} - i_{nc20})$, 电容电流将导致光伏电源侧零序电流 i_{m0} 与系统侧零序电流 i_{n0} 存在相位偏差。此外, 新能源侧及系统侧变压器零序阻抗的差异亦会对零序电流相位产生影响。若仍假设线路两端的零序电流相位相等, 直接利用新能源侧保护安装处的零序电流来等效故障点电流, 则会引入较大的算法误差, 影响保护的可靠动作。因此亟需一种计及故障点两侧零序电流相位差的新能源送出线路时域距离保护改进方案。

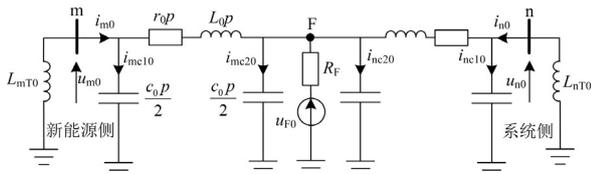


图 2 考虑分布电容的零序等效电路图

Fig. 2 Equivalent zero sequence circuit diagram considering distributed capacitance

2 计及故障点两侧电流相位差的改进时域距离保护方案

2.1 故障回路方程推导

根据第 1 节分析可知, 故障点两侧零序电流相位不同会导致中长距离新能源送出线路时域距离保护可靠性降低。因此, 本文提出了一种计及故障点两侧零序电流相位差的新能源送出线路时域距离保护改进方案。以图 1 中的 A 相发生单相接地故障为例, 对电流进行零序补偿, 式(1)可变化为

$$u_{ma} = r_1 p (i_{ma} + K_r i_{m0}) + L_1 p \frac{d(i_{ma} + K_1 i_{m0})}{d t} + i_{Fa} R_F \quad (3)$$

式中: u_{ma} 、 i_{ma} 分别表示故障时新能源侧保护安装处 A 相的电压、电流时域电气量信息; K_r 、 K_1 分别表示零序电阻、电感的补偿系数, $K_r = (r_0 - r_1) / r_1$, $K_1 = (L_0 - L_1) / L_1$; r_1 、 L_1 分别为线路单位长度的正序电阻、电感值; i_{Fa} 为流过 A 相过渡电阻的电流。

由于保护安装处无法测得对侧系统的零序电流。对于单相接地故障, 在对故障电路进行等效时, 需要考虑故障点两侧零序电流存在相位偏差。因此, 假设 $3i_{m0}$ 与 i_{Fa} 之间差一个复系数 \hat{N}_2 , 此时 $\hat{N}_2 = N_{21} + jN_{22}$, 则 $i_{Fa} = 3\hat{N}_2 i_{m0}$ 。

因此可将式(3)变换为

$$u_{ma} = r_1 p (i_{ma} + K_r i_{m0}) + L_1 p \frac{d(i_{ma} + K_1 i_{m0})}{d t} + 3\hat{N}_2 i_{m0} R_F \quad (4)$$

在复频域中有

$$\hat{N}_2 R_F = (N_{21} + jN_{22}) R_F = R'_F + j\omega L'_F \quad (5)$$

式中: N_{21} 、 N_{22} 为实系数; L'_F 为等效过渡电感。

由式(5)可知, 可以将过渡电阻 R_F 拆分为等效过渡电阻 R'_F 加等效过渡电感 L'_F 的形式, 如图 3 所示, 图 3(a)和图 3(b)分别为过渡电阻拆分前后的等效电路图, 其中 R'_F 及 L'_F 均为未知量。

将式(5)代入式(4)中可得到计及故障点两侧零序电流相位差的故障回路方程, 如式(6)所示。

$$u_{ma} = r_1 p (i_{ma} + K_r i_{m0}) + L_1 p \frac{d(i_{ma} + K_1 i_{m0})}{d t} + 3 i_{m0} R'_F + 3 \frac{d i_{m0}}{d t} L'_F \quad (6)$$

式(6)中共含有 p 、 R'_F 、 L'_F 3 个未知量, 其中故障距离 p 为待求量。

整理式(6)可得

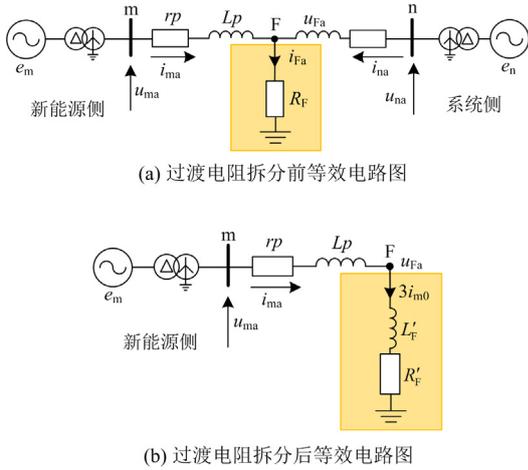


图3 过渡电阻拆分前后等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram before and after splitting the transition resistance

$$A_1 p + A_2 R'_F + A_3 L'_F = B \quad (7)$$

式中, A_1 、 A_2 、 A_3 、 B 分别为不同的系数值。

式(7)是关于未知参数 p 、 R'_F 、 L'_F 的线性方程,

其中

$$\begin{cases} A_1 = r_1(i_{ma} + K_r i_{m0}) + L_1 \frac{d(i_{ma} + K_r i_{m0})}{dt} \\ A_2 = 3i_{m0} \\ A_3 = 3 \frac{di_{m0}}{dt} \\ B = u_{ma} \end{cases} \quad (8)$$

对式(7)进行离散化处理, 利用差分代替微分, 根据三点微分公式可知, 式中每一采样时刻 k 的微分可用上一采样时刻和下一采样时刻的差分求解, 即

$$\begin{cases} \frac{di_{ma}(k)}{dt} = \frac{i_{ma}(k+1) - i_{ma}(k-1)}{2\Delta t} \\ \frac{di_{m0}(k)}{dt} = \frac{i_{m0}(k+1) - i_{m0}(k-1)}{2\Delta t} \end{cases} \quad (9)$$

式中, Δt 为采样的时间间隔。

为保证保护的速动性要求, 选择数据窗长为 5 ms。当新能源送出线路发生单相接地故障后, 提取新能源侧保护安装处的电压、电流时域电气量信息。根据式(7)可知, 式(8)中各系数的值在不同采样时刻各不相同, 利用数据窗内 3 组采样点的测量值建立 3 个与式(7)对应的方程, 可求得一个故障距离。因此, 为了提高计算得到的故障距离的精度, 以时间窗内的采样时刻 $k-1$ 、 k 、 $k+1$ 为一组计算出一个故障距离, 并对全部计算出的故障距离进行最小二乘拟合, 得到计算故障距离 p_f 。最小二乘法拟合得到的计算故障距离 p_f 用于判断保护是否动

作。

2.2 保护算法及流程图

当新能源送出线路发生故障时保护启动, 首先提取新能源侧保护安装处的电压、电流时域电气量信息, 用差分代替微分求解每一采样时刻的微分, 将数据代入故障回路方程组计算故障距离, 并对结果进行最小二乘拟合。将经最小二乘法拟合得到的计算故障距离 p_f 与整定距离 p_{set} 相比较, 若满足 $0 < p_f < p_{set}$, 则保护动作, 反之则保护不动作。

计及故障点两侧零序电流相位差的时域距离保护流程图如图 4 所示。其中 t_f 为故障时间, 在故障发生时为零时刻。

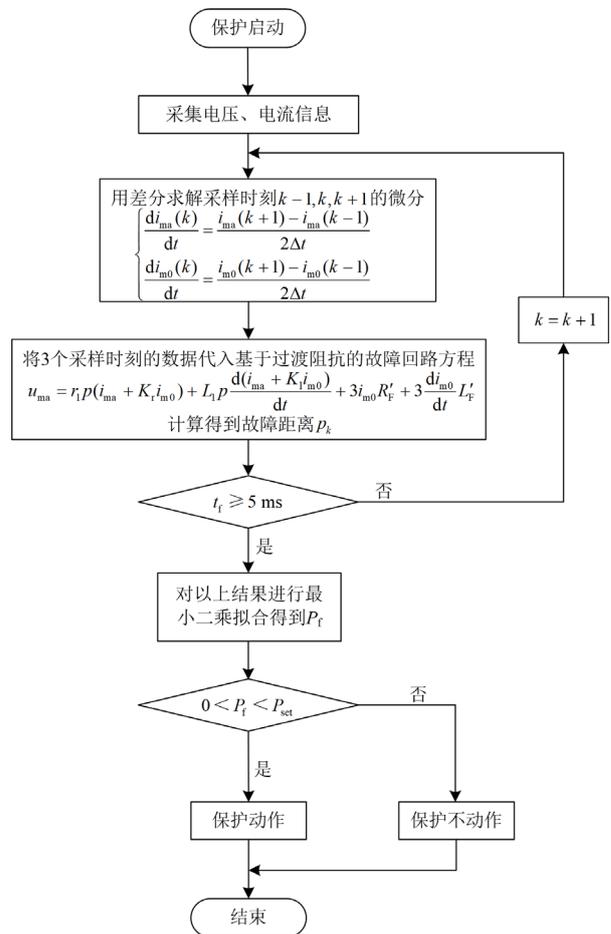


图4 改进的时域距离保护流程图

Fig. 4 Flowchart of improved time domain distance protection

3 仿真实验

基于某地区光伏并网系统送出线路的实际网络结构及参数数据, 基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台, 搭建如图 5 所示的光伏并网系统仿真模型, 提取光伏电源侧保护安装处的电压、电流时域电气量信息。在 Matlab 环境下编写时域距离保护算法程序, 将提

取到的光伏电源侧保护安装处的电压、电流时域电气量信息代入求解,实现时域距离保护的可靠运行。



图5 光伏并网系统仿真拓扑图

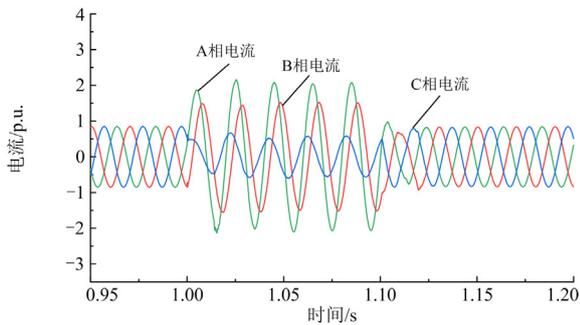
Fig. 5 Simulation topology of photovoltaic connected system

具体模型参数如下:采样频率为 10 kHz。光伏电站的额定容量为 200 MW。光伏电站经变压器升压后经送出线路汇入系统。对侧系统电压等级为 220 kV。光伏并网系统送出线路电压等级为 220 kV,送出线路长度为 100 km。送出线路单位长度正序电阻、电感分别为 0.085 Ω/km、0.637 mH/km;单位长度零序电阻、电感分别为 0.255 Ω/km、1.910 mH/km。光伏并网系统送出线路发生 A 相接地故障。

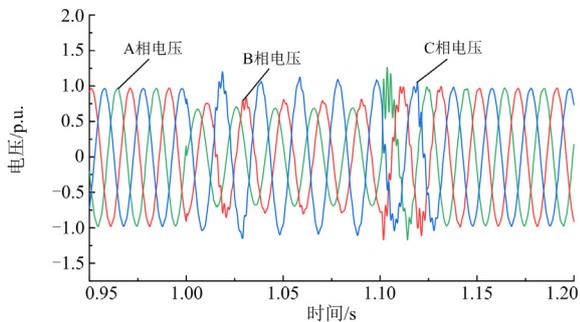
以距离保护 I 段为例进行分析, I 段保护范围为线路全长的 80%,由于光伏并网系统送出线路全长为 100 km。因此,整定距离选择为 $p_{set} = 80 \text{ km}$ 。

3.1 故障特性

光伏并网系统送出线路距光伏电源 70 km 处发生单相接地故障,过渡电阻为 20 Ω,故障持续时间为 0.1 s,光伏电源侧电流、电压波形如图 6 所示。



(a) 光伏电源侧电流波形图



(b) 光伏电源侧电压波形图

图6 光伏电源侧电流、电压波形图

Fig. 6 Current and voltage waveform of photovoltaic power supply side

由图 6(a)可知,当光伏并网系统发生单相接地故障时,故障相与非故障相电流的相位基本保持一致,这是由于存在较大的零序分量,导致电流表现出弱馈特征。由图 6(b)可知,换流器中装有大量电力电子元件,这些元件会导致电压波形产生大量高次谐波,因此,光伏并网系统故障特征明显不同于常规能源。

光伏并网系统送出线路距光伏电源 70 km 处发生单相接地故障,过渡电阻为 300 Ω,故障持续时间为 0.1 s,光伏电源侧及系统侧零序电流的波形图如图 7 所示。

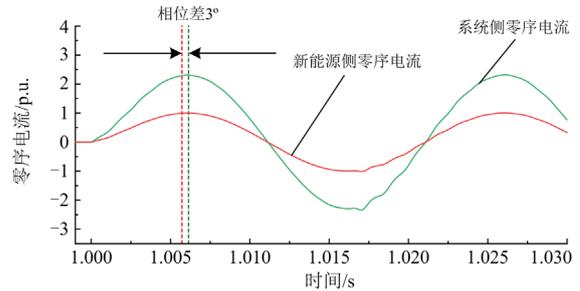


图7 光伏电源侧及系统侧零序电流波形图

Fig. 7 Waveform diagram of zero sequence current on the photovoltaic power supply side and system side

由图 7 可知,由于线路分布电容的存在,电容电流导致光伏电源侧及系统侧零序电流相位发生变化,线路两端零序电流相位偏差接近 3°。

在上述故障情况下,采用现有时域距离保护和改进时域距离保护算法得到的计算故障距离分别为 96.7414 km 和 69.0861 km,误差分别为 38.2%和 1.3%。由此可见,当光伏电源侧与系统侧零序电流相位偏差为 3°时会导致现有时域距离保护计算结果产生较大偏差,与实际故障距离相差 26.7414 km,计算故障距离 p_f 大于整定距离 p_{set} ,导致保护不正确动作。而采用本文提出的改进时域距离保护方案,计算故障距离 p_f 与实际故障距离的误差小于 1 km,精度较高。因此,本文所提保护方案不受故障点两侧零序电流相位差的影响,有较高的可靠性。

3.2 不同故障距离下保护动作情况

为了更好地对比现有时域距离保护和本文所提改进时域距离保护方案的准确性,对光伏并网系统送出线路在不同故障距离下发生单相经高阻接地故障时的计算故障距离进行仿真计算,设置故障电阻为 300 Ω,故障持续时间为 0.5 s,结果汇总如表 1 所示,其误差曲线图如图 8 所示,其误差计算公式为

$$\delta = |\text{计算故障距离} - \text{故障距离}| / \text{线路全长} \quad (10)$$

式中, δ 为计算故障距离的误差。

表 1 现有和改进时域距离保护不同故障距离下
计算故障距离误差对比($R_F = 300 \Omega$)

Table 1 Comparison of error in calculating fault distance between
existing and improved time domain distance protection
under different fault distances ($R_F = 300 \Omega$)

故障 距离/km	计算故障距离 (现有)/km	误差 (现有)/%	计算故障距离 (改进)/km	误差 (改进)/%
5	-1.1949	6.195	5.8437	0.844
10	3.8726	6.127	10.9352	0.935
30	24.9706	5.029	30.8808	0.881
50	50.0271	0.027	50.4136	0.414
60	67.6384	7.638	59.8819	0.118
70	96.7414	26.741	69.0861	0.914
75	122.6095	47.610	73.3959	1.604
80	167.8142	87.814	77.3954	2.605

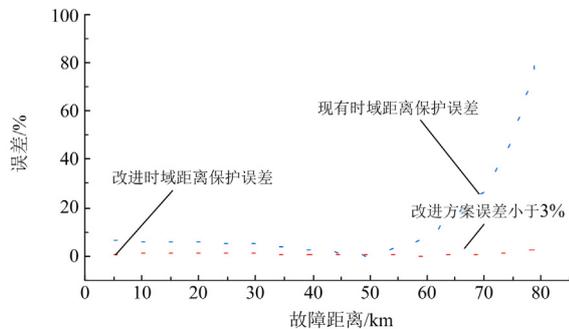


图 8 不同故障距离下误差曲线图($R_F = 300 \Omega$)

Fig. 8 Error curve under different fault distances ($R_F = 300 \Omega$)

根据表 1 和图 8 可知, 采用现有时域距离保护方案, 光伏并网系统送出线路发生单相经高阻接地故障, 在送出线路首端及末端发生故障时, 计算故障距离不准确, 保护动作结果不正确。这是由于当线路首端及末端发生故障时, 故障点两侧分布电容的大小差距较大, 线路两端零序电流相位偏差较明显。因此, 现有时域距离保护方案未考虑故障点两侧零序电流相位不同, 存在较大的算法误差, 当过渡电阻较大时, 进一步放大了这一误差, 使保护存在不正确动作的风险。

本文提出的改进时域距离保护方案在过渡电阻为 300Ω 时, 计算故障距离的误差均小于 3%, 保护均正确动作, 说明本文所提方案消除了故障点两侧零序电流相位不同造成的保护算法误差, 证明了该方案的准确性。

3.3 不同过渡电阻下保护动作情况

以故障距离为距光伏电源侧 70 km、过渡电阻为 100Ω 为例, 分别仿真了现有基于 R-L 模型的时域距离保护与本文所提计及故障点两侧零序电流相

位差的改进时域距离保护方案的测距结果, 计算结果如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 现有时域距离保护计算结果误差较大, 无法满足保护的可靠性要求。改进的时域距离保护计算故障距离与实际故障距离的误差小于 1 km。在过渡电阻较高的情况下, 此方案仍然有较高的精度。

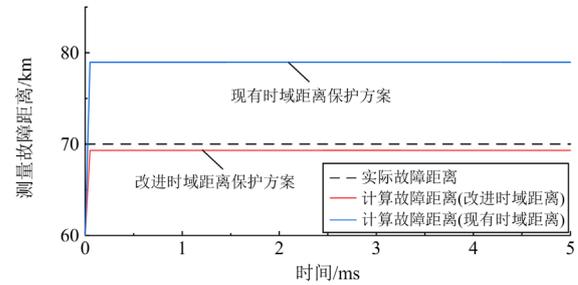


图 9 故障距离为 70 km 时 100Ω 过渡电阻下测距结果

Fig. 9 Distance measurement results under 100Ω transition resistance at a fault distance of 70 km

为了更好地对比现有时域距离保护和本文所提改进时域距离保护方案的准确性, 仿真光伏并网系统送出线路在不同过渡电阻下发生单相接地故障时的计算故障距离。当光伏并网系统送出线路距光伏电源 70 km 处发生单相接地故障时, 设置故障持续时间为 0.5 s, 不同过渡电阻下采用现有时域距离保护方案及本文所提改进时域距离保护方案的动作情况汇总如表 2 所示, 其误差曲线图如图 10 所示。

由表 2 和图 10 可知, 在光伏并网系统送出线路发生单相接地故障时, 现有时域距离保护方案的计算故障距离误差随着过渡电阻的增大而逐渐增大, 当过渡电阻大于 150Ω 时, 保护动作不正确。这是由于现有时域距离保护未考虑故障点两侧零序电流

表 2 现有和改进时域距离保护不同过渡电阻下
计算故障距离误差对比 ($p_f = 70 \text{ km}$)

Table 2 Comparison of error in calculating fault distance between
existing and improved time domain distance protection with
different transition resistances ($p_f = 70 \text{ km}$)

过渡电阻/ Ω	计算故障距离 (现有)/km	误差 (现有)/%	计算故障(改进) 距离/km	误差 (改进)/%
0	70.0002	0.000	69.9143	0.086
25	72.2276	2.228	69.6251	0.375
50	74.4561	4.456	69.4276	0.572
100	78.9140	8.914	69.2539	0.746
150	83.3717	13.372	69.1897	0.810
200	87.8288	17.829	69.1319	0.868
250	92.2854	22.285	69.1073	0.8927
300	96.7414	26.741	69.0861	0.9139

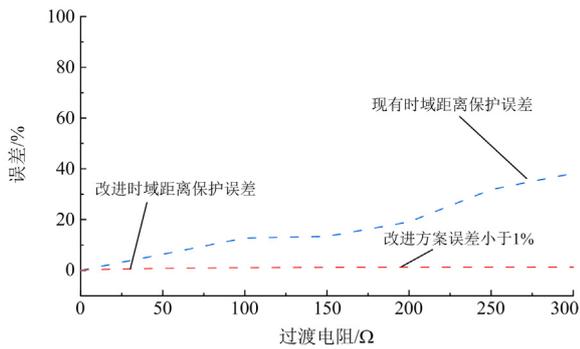


图 10 不同过渡电阻下误差曲线图 ($p_f = 70 \text{ km}$)

Fig. 10 Error curve under different transition resistances ($p_f = 70 \text{ km}$)

存在相位偏差,根据式(2)可知,当过渡电阻较小时,过渡电阻与零序电流的乘积也较小,保护算法误差小,然而当过渡电阻较大时,过渡电阻与零序电流的乘积也进一步增大,导致保护算法误差随之增大。

而本文提出的改进时域距离保护方案随着故障过渡电阻的逐渐增大,计算故障距离的误差并没有明显的增大,过渡电阻从 0Ω 增大到 300Ω ,其误差均在 1% 以内,保护均能正确动作。说明本文所提改进时域距离保护方案在耐受过渡电阻能力方面具有明显优势。

由以上仿真数据可以看出,现有时域距离保护方案在新能源送出线路发生单相接地故障的场景下保护可靠性较差。本文提出的计及故障点两侧零序电流相位差的时域距离保护方案抗过渡电阻的能力较强,适用于新能源送出线路发生单相接地故障的场景。

4 结论

针对新能源送出线路发生单相接地故障时工频量距离保护和时域距离保护可靠性降低的问题,本文提出了一种计及故障点两侧零序电流相位差的时域距离保护方案。

通过仿真对比两种时域距离保护在光伏并网系统送出线路发生单相接地故障时的动作情况,得出以下结论:

1) 当新能源送出线路发生单相接地故障时,线路分布电容及变压器的零序阻抗将对故障点两侧零序网络阻抗角产生影响,导致线路两端零序电流存在相位偏差。

2) 本文计及故障点两侧零序电流相位差的影响,将过渡电阻等效为过渡阻抗的形式,建立了包

含 3 个未知量的故障回路方程。与现有时域距离保护算法相比,本文所提时域距离保护方案具有较好的抗过渡电阻能力,计算故障距离的误差较小,可以较好地适用于新能源经中远距离交流线路送出的场景。

参考文献

- [1] 文劲宇,周博,魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10.
WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10.
- [2] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [3] 温志文,贾科,余磊,等. 基于时频特性相似度的新能源场站 T 接型送出线路高速保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 1-11.
WEN Zhiwen, JIA Ke, YU Lei, et al. High speed protection based on time-frequency characteristic similarity for a Teed transmission line connected to renewable energy power plants[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 1-11.
- [4] 曾翔,文明浩,钱堃,等. 逆变型分布式电源接入对接地距离保护的影响与对策[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 46-53.
ZENG Xiang, WEN Minghao, QIAN Kun, et al. Influence of inverter-interfaced distributed generation integration on grounding distance protection and its strategies[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 46-53.
- [5] 郑博文,王增平,吕哲,等. 基于暂态量的继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 18-25.
ZHENG Bowen, WANG Zengping, LÜ Zhe, et al. Research on transient-based relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 18-25.
- [6] ZHONG Xian, FAN Yanfang, CHEN Weiwei, et al. Study on LVRT coordinate control strategy of DFIG when considering non-rotor side crowbar protection[J]. JCIS, 2015, 11(18): 6747-6757.
- [7] 郭金学,南东亮,郝红岩,等. 光伏电站接入对距离保护和重合闸的影响[J]. 电气技术, 2017(11): 25-31, 38.
GUO Jinxue, NAN Dongliang, HAO Hongyan, et al. Effects of PV power station on distance protection and automatic reclosing[J]. Electrical Engineering, 2017(11): 25-31, 38.

- [8] 毕天姝, 李彦宾, 马丽红, 等. 风场及其送出线保护配置与整定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 45-50.
BI Tianshu, LI Yanbin, MA Lihong, et al. Configuration and setting of relay protection for wind farm and its outgoing line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 45-50.
- [9] 张太升, 韩伟, 杨霖, 等. 基于波形相关分析的双馈风电场送出线时域距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 82-88.
ZHANG Taisheng, HAN Wei, YANG Lin, et al. Time-domain distance protection for transmission lines of doubly-fed wind farms based on waveform correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 82-88.
- [10] 卜强生, 高磊, 宋亮亮, 等. 风电场短路电压电流频率不一致对距离保护及测试的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 21-27.
BU Qiangsheng, GAO Lei, SONG Liangliang, et al. Short circuit current and voltage frequency inconsistency in wind farm and its effect on distance protection and relay protection test[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 21-27.
- [11] 裘愉涛, 潘武略, 倪传坤, 等. 风电场送出线等传变距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 61-66.
QIU Yutao, PAN Wulüe, NI Chuankun, et al. Equal transfer process-based distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 61-66.
- [12] 范小红, 孙士云, 张雪娟, 等. 双馈风电场短路电流特性对距离保护的影响及保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 18-27.
FAN Xiaohong, SUN Shiyun, ZHANG Xuejuan, et al. Study on the influence of short-circuit current characteristics of a doubly-fed wind farm on distance protection and protection strategy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 18-27.
- [13] 索南加乐, 王增超, 张健康, 等. 基于参数识别的高阻接地距离保护算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 173-178.
SUONAN Jiale, WANG Zengchao, ZHANG Jiankang, et al. A novel distance protection algorithm for high resistance grounding faults based on parameter identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 173-178.
- [14] LIANG Zhengfeng, GAO Feiyan, ZHANG Huizhi. Research on setting method of time domain distance protection[C] // 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), October 21-24, 2019, Xi'an, China: 1268-1272.
- [15] 王春又, 束洪春, 孙士云, 等. 基于实测数据的双馈风电场集电线路时域距离保护[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(9): 113-121.
WANG Chunyou, SHU Hongchun, SUN Shiyun, et al. Time domain distance protection of the collector line of the double-fed wind power farm based on measured data[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(9): 113-121.
- [16] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [17] 贺家李, 李永丽, 董新洲, 等. 电力系统继电保护原理[M]. 5版. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [18] WANG C Q, SONG G B, TANG J S. Protection performance of traditional distance relays under wind power integration[C] // 13th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP), March 7-10, 2016, Edinburgh, UK: 7-10.
- [19] QUISPE J C, ORDUÑA E. Transmission line protection challenges influenced by inverter-based resources: a review[J]. Protection and Control of modern Power Systems, 2022, 7(1): 28-44.
- [20] 陈明, 张涛. 基于 R-L 模型算法的距离保护研究与 PSCAD 仿真[J]. 电力学报, 2010, 25(2): 167-170.
CHEN Ming, ZHANG Tao. Study of distance protection based on R-L model algorithm and its simulation in PSCAD[J]. Journal of Electric Power, 2010, 25(2): 167-170.
- [21] 李景丽, 袁豪, 徐铭铭, 等. 小电阻接地系统高阻接地故障检测技术综述[J]. 电测与仪表, 2023, 60(6): 10-18, 51.
LI Jingli, YUAN Hao, XU Mingming, et al. Overview of high impedance fault detection technology in small resistance grounding system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(6): 10-18, 51.
- [22] ANDRE D F, RODRIGO H S, MARIANA R, et al. Ground distance relaying with fault-resistance compensation for unbalanced systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1319-1326.
- [23] 罗显通, 罗建. 一种适于高阻接地的单端时域测距算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 6-9, 14.
LUO Xiantong, LUO Jian. A time-domain fault location algorithm for high resistance grounding using one terminal data[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 6-9, 14.

收稿日期: 2023-03-21; 修回日期: 2023-07-15

作者简介:

叶远波(1973—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: yeyb7079@ah.sgcc.com.cn

(编辑 许威)