

含分布式新能源高压电网的新型线路保护方案

卢正飞¹, 蒋焘², 黄福全¹, 张安龙¹, 文明浩², 马帅¹

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001; 2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 武汉 430074)

摘要: 对于含分布式新能源的高压电网, 由于新能源电源种类繁多、故障特性复杂, 传统线路保护存在一系列适应性问题。时域微分方程算法可以求解故障距离, 在含新能源电源的系统中有良好的适用性, 但存在“暂态超越”现象和“电压死区”问题。为此提出了一种新型线路保护方案: 在线路非保护出口附近发生故障时进行故障点电压重构和等传变处理, 再代入到时域微分方程算法中, 即采用等传变快速距离保护算法; 在线路保护出口附近发生故障时计算测量电压降落与计算电压降落的相关系数, 利用二者变化趋势的一致性判断出口故障方向。该线路保护方案能够准确判断线路故障, 不受新能源电源种类、容量及故障特性的影响。仿真分析表明了该方案的适用性。

关键词: 新能源; 距离保护; 方向元件; 线路保护

A New Line Protection Scheme for High Voltage Grids with Distributed New Energy Sources

LU Zhengfei¹, JIANG Tao², HUANG Fuquan¹, ZHANG Anlong¹, WEN Minghao², MA Shuai¹

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518001, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: For high voltage grids containing distributed new energy sources, there are a range of adaptability problems with traditional line protection due to the variety of new energy sources and complex fault characteristics. The time domain differential equation algorithm can solve for fault distances, which has good applicability in systems containing new energy sources, but there is a "transient override" phenomenon and "voltage dead zone" problem. For this reason, a new line protection scheme is proposed. When a fault occurs on the line and it is not near the outlet of the line protection, the fault point voltage is reconstructed and isotransformed, and then substituted into the time domain differential equation algorithm, which is the isotransformed fast distance protection algorithm; when a fault occurs near the outlet of the line protection, the correlation coefficient between the measured voltage drop and the calculated voltage drop are calculated and the consistency of the two trends is used to determine the direction of the outlet fault. The line protection scheme can accurately determine line faults, regardless of the type of new energy source, capacity and fault characteristics. Simulation analysis shows the applicability of the scheme.

Key words: new energy; distance protection; directional relay; line protection

0 引言

在“双碳”战略的驱动下, 风、光等新能源发电技术不断提高, 越来越多的新能源电站以分布式电源的形式接入电网^[1-3]。这使得电网结构复杂化, 从传统的单端电源辐射状网络变成了的多端电源网

络; 同时, 新能源电源的故障特性复杂, 导致电网故障特征不同于以同步发电机为主的传统电网, 给线路保护带来了不利影响^[4-5]。

新能源电源主要分为全功率变换器型和部分功率变换器型两类, 全功率变换器型主要包含永磁直驱风力发电机组和光伏电池组, 部分功率变换器型电源主要为双馈风力发电机组。目前, 已有大量文献针对新能源电源故障特性以及其对线路距离保护的影响进行了研究^[6-12]。文献[6-7]指出直驱风机在故障期间受抑制负序电流的控制策略影响, 正负

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52277103)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52277103).

序阻抗幅值和相角偏差较大。文献[8]指出双馈风机在故障期间受不同励磁控制方式影响,短路电流存在阶段性特征。文献[9]指出了新能源的高谐波和频偏特性使得工频量距离保护存在相量提取问题。文献[10]分析了逆变型电源故障特性的影响,指出短路电流的幅值受限和相角受控特性可能导致距离保护可能出现不正确动作。文献[11-12]分析了风电系统的故障特征对正序电压极化距离保护的影响,指出保护存在不正确动作风险。综上,对于含分布式新能源接入的高压电网,传统距离保护存在一系列适应性问题。

为了解决上述问题,相关文献提出了一些保护算法^[13-15]。文献[13]提出一种基于小波尺度变换的算法,能在时间和频率上对电气量进行精确分析,但该方法对装置采样速率要求高,受线路边界元件特性影响大,难以界定高频分量的门槛。文献[14-15]提出的基于R-L模型的时域微分方程算法具有不需要滤除非周期分量以及不受电源阻抗特性变化影响等优点,但在暂态过程中的计算距离不够准确,且难以准确区分线路保护出口附近的故障方向。

等传变距离保护在新能源接入电网交流线路故障时能够正确动作,但存在电压死区问题。在此基础上,针对含分布式新能源高压电网的送出线路,本文提出了一种方向元件与等传变距离保护配合构建新型线路保护方案。当故障点不在线路保护出口附近时采用等传变快速距离保护算法,对故障点电压进行重构并经过等传变处理,再代入到时域微分方程算法,能够准确计算故障距离;当故障点位于线路保护出口附近时采用基于电压波形相关系数的方向元件,通过比较测量电压降落与计算电压降落变化趋势的一致性,能够有效区分线路保护出口附近的正向故障与反向故障。二者相互配合,共同构成了适用于含分布式新能源高压电网的送出线路时域距离保护方案。仿真结果表明,本文提出的保护方案能够不受分布式电源种类、容量、故障穿越控制策略影响,准确判断出线路故障。

1 故障特性分析

1.1 典型场景

典型的含分布式新能源的高压电网系统结构如图1所示,分布式新能源电源依次通过10/110 kV

升压变压器和送出线路与交流系统连接,交流系统的电源以同步电机为主。M和N分别为送出线路的新能源侧和交流系统侧的保护装置。



图1 含分布式新能源的交流系统

Fig. 1 AC system interconnnected with distributed new energy access system

以送出线路为研究对象,将含分布式新能源的系统简化,在线路上设置故障,如图2所示。规定电流的正方向为从母线流向线路, i_m 和 i_n 分别为流过线路两侧保护安装处的电流。 Z_L 为线路等值阻抗、 Z_N 为交流系统的等值阻抗、 E_N 为交流系统的等值电压。选取故障点位置K, K1—K4。其中,K位于线路中间某处, α 为故障点到线路新能源侧的距离占线路总长的百分比;K1和K2分别位于线路新能源侧保护的反向出口、正向出口;K3和K4分别位于线路系统侧保护的正向出口、反向出口。

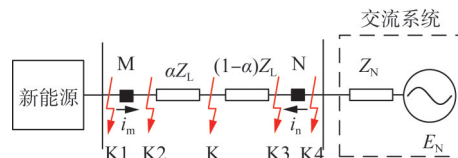


图2 新能源接入系统简化示意图

Fig. 2 Simplified diagram of new energy access system

1.2 等传变快速距离保护原理

时域微分方程算法可以快速计算故障距离,但受低通滤波算法的影响,暂态过程中的测距精度降低。以金属性单相接地故障为例,在经过低通滤波处理得到保护安装处的电压和电流瞬时值以后,如果简单地认为故障点电压在故障时刻为0,则计算故障距离时可能出现暂态超越现象。为解决上述问题,需要对故障点电压进行重构,并经过等传变处理,再代入到基于R-L模型的时域微分方程算法中。文献[16-18]给出了等传变处理的主要流程。

以交流线路发生单相接地故障为例,基于R-L模型的时域微分方程算法表示为:

$$\Delta u_{\varphi}(t) = L_1 \frac{d(i_{\varphi}(t) - i_0(t))}{dt} + L_0 \frac{di_0(t)}{dt} + R_1(i_{\varphi}(t) - i_0(t)) + R_0 i_0(t) \quad (1)$$

$$u_{\varphi}(t) = \Delta u_{\varphi}(t)l + u_f(t) \quad (2)$$

式中: $\Delta u_\varphi(t)$ 为单位线路长度 φ 上的电压降; $u_\varphi(t)$ 和 $i_\varphi(t)$ 分别为保护安装处测得的故障相电压及电流; $i_0(t)$ 为流经保护安装处的零序电流; R_1 、 L_1 分别为单位长度线路正序电阻、正序电感; R_0 、 L_0 分别为单位长度线路零序电阻、零序电感; $u_f(t)$ 为故障点电压; l 为待求的故障距离。

将一个数据窗长的采样数据代入式(2)构成微分方程组, 使用最小二乘法求解故障距离, 然后与整定距离 l_{set} 比较。当满足式(3)时认为发生区内故障。

$$0 < l < l_{\text{set}} \quad (3)$$

1.3 出口故障方向判别原理

当线路保护出口附近发生故障时, 由于测量电压趋于 0, 等传变快速距离保护算法无法区分正向故障与反向故障, 即存在“电压死区”问题, 因此需要专门配置针对出口故障的方向元件。传统方向元件一般基于电源正序阻抗及负序阻抗特征, 而新能源电源具有阻抗变化特性, 故可能不正确动作^[19]。文献[20]提出了一种出口故障方向快速判别元件, 但不能直接应用于含分布式新能源的交流系统中。

以图 2 所示含分布式新能源的交流系统为例, 定义从保护安装处到交流系统等值电源 E_N 的电压差为测量电压降 $u_1(t)$; 定义采用保护安装处与交流系统等值电源 E_N 之间的线路阻抗和系统等值阻抗, 以及保护安装处测量电流计算得到的电压降落为计算电压降 $u_2(t)$ 。以三相故障为例, 当线路保护出口附近发生故障时, 若故障电流由交流系统提供, 测量电压降和计算电压降的变化趋势具有一致性; 若故障电流由分布式新能源电源提供, 测量电压降和计算电压降的变化趋势不一致。

1.3.1 故障点位于线路新能源侧出口

故障点位于线路新能源侧保护装置 M 附近, 如图 2 所示。以三相故障为例, 测量电压降 $u_{1M}(t)$ 和计算电压降 $u_{2M}(t)$ 分别为:

$$u_{1M}(t) = u_m(t) - e_N(t) \quad (4)$$

$$u_{2M}(t) = (L_L + L_N) \frac{di_m(t)}{dt} + (R_L + R_N)i_m(t) \quad (5)$$

式中: $u_m(t)$ 和 $i_m(t)$ 分别为线路新能源侧保护安装处的测量电压和测量电流的瞬时值; L_L 和 R_L 分别为送出线路的等值电感和等值电阻; L_N 和 R_N 分别为交流系统的等值电感和等值电阻; $e_N(t)$ 为交流系统等值电源的瞬时值。由于交流系统的等值电源以同步

发电机为主, 故 $e_N(t)$ 具有惯性, 可以认为在故障发生前后的短时间内 $e_N(t)$ 的变化规律基本不变。因此, $e_N(t)$ 可由式(6)表示。

$$e_N(t) = u_m(t - nT) - (L_L + L_N) \frac{di_m(t - nT)}{dt} - (R_L + R_N)i_m(t - nT) \quad (6)$$

式中: $u_m(t - nT)$ 和 $i_m(t - nT)$ 分别为线路新能源侧保护装置 M 测得的记忆电压和记忆电流; T 为工频周期, n 取 2。

1) 反向故障

图 2 中故障点 K_1 为典型的出口反向故障, 此时流过线路新能源侧保护安装处的故障电流由交流系统等值电源 E_N 提供。根据式(1)、式(4)和式(5), 可以得到式(7)。

$$u_{1M}(t) = u_{2M}(t) \quad (7)$$

当线路新能源侧发生反向出口故障时, 测量电压降 $u_{1M}(t)$ 和计算电压降 $u_{2M}(t)$ 相等, 故两种电压降的变化趋势一致。

2) 正向故障

图 2 中故障点 K_2 为典型的出口正向故障, 此时流过线路新能源侧保护安装处的故障电流由背后系统提供, 故式(5)不能真实反映线路阻抗和交流系统等值阻抗上的实际电压降落。此时实际电压降落 $u_{\text{act}}(t)$ 为:

$$u_{\text{act}}(t) = -(L_L + L_N) \frac{di_n(t)}{dt} - (R_L + R_N)i_n(t) \quad (8)$$

式中 $i_n(t)$ 为流经线路阻抗和系统等值阻抗的故障电流。在发生正向出口故障后的短时间内, 由于保护安装处的测量电压 $u_m(t)$ 迅速跌落为 0, 而 $e_N(t)$ 变化规律不变, 故测量电压降 $u_{1M}(t)$ 迅速变化。计算电压降 $u_{2M}(t)$ 依赖于保护安装处的测量电流 $i_m(t)$, 会受到新能源电源的故障穿越控制策略影响。逆变型电源在故障后 2 ms 内提供的故障电流没有正序无功电流和负序电流, 且正序有功电流略微增大^[21]。双馈风机的故障暂态输出具有受限性和多态性^[22-24], 即故障电流的幅值有限且变化过程和规律表现出多样性^[25]。因此, 当线路新能源侧发生正向出口故障时两种电压降落的变化趋势不一致。

1.3.2 故障点位于线路交流系统侧出口

故障点位于线路系统侧保护装置 N 附近, 如图 2 所示。以三相故障为例, 测量电压降落 $u_{1N}(t)$ 和计算电压降落 $u_{2N}(t)$ 分别为:

$$u_{1N}(t) = u_n(t) - e_N(t) \quad (9)$$

$$u_{2N}(t) = -L_N \frac{di_n(t)}{dt} - R_N i_n(t) \quad (10)$$

式中 $u_n(t)$ 和 $i_n(t)$ 分别为线路系统侧保护安装处的测量电压和测量电流的瞬时值。由于 $e_N(t)$ 具有惯性, 可由式(11)表示。

$$e_N(t) = u_n(t - nT) + L_N \frac{di_n(t - nT)}{dt} + R_N i_n(t - nT) \quad (11)$$

式中 $u_n(t - nT)$ 和 $i_n(t - nT)$ 分别为保护装置 N 测得的记忆电压和记忆电流, n 取 2。

对于线路系统侧保护出口附近的故障, 根据故障电流来源, 类比线路新能源侧保护出口附近的故障, 结论如下: 当线路系统侧发生正向出口故障时两种电压降落的变化趋势具有一致性; 当线路系统侧发生反向出口故障时两种电压降落的变化趋势不一致。

1.3.3 基于电压波形相关系数的方向元件

根据 1.3.2 节, 当线路保护出口附近发生故障时, 测量电压降落 $u_1(t)$ 和计算电压降落 $u_2(t)$ 变化趋势一致性主要与故障电流来源有关。为了定量地衡量两种电压降落变化趋势的一致性, 定义电压波形相关系数如式(12)所示。

$$r_{u1, u2} = \frac{\sum_{i=1}^W [u_1(i) - \bar{u}_1][u_2(i) - \bar{u}_2]}{\sqrt{\sum_{i=1}^W [u_1(i) - \bar{u}_1]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^W [u_2(i) - \bar{u}_2]^2}} \quad (12)$$

式中: $u_1(i)$ 和 $u_2(i)$ 分别为测量电压降落和计算电压降落在第 i 时刻的计算值; W 为一个数据窗内的采样点数量; $\bar{u}_1$ 和 $\bar{u}_2$ 分别为 $u_1(i)$ 和 $u_2(i)$ 在一个数据窗内的平均值。显然, $r_{u1, u2}$ 的取值范围是 $[-1, 1]$, 当 $r_{u1, u2} = 1$ 时, 意味着 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 完全正相关; 当 $r_{u1, u2} = -1$ 时, 意味着 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 完全负相关。

对于含分布式新能源的交流系统, 当故障点位于线路新能源侧保护出口附近时两种电压降落的相关系数在反向故障时明显大于正向故障; 当故障点位于线路系统侧保护出口附近时, 两种电压降落的相关系数在正向故障时明显大于反向故障。利用这一特点可以实现线路保护出口附近故障时的方向判别, 构造线路新能源侧、系统侧的方向判据分别如式(13)——(14)所示。

$$r_{u1M, u2M} \leq r_{\text{setM}} \quad (13)$$

$$r_{u1N, u2N} \geq r_{\text{setN}} \quad (14)$$

式中 r_{setM} 、 r_{setN} 分别为线路新能源侧、系统侧保护安装处的电压波形相关系数的整定值。当式(13)——(14)满足时, 认为发生线路保护出口附近发生正向故障。

2 新型线路保护方案

针对含分布式新能源交流系统的送出线路, 本文在等传变快速距离保护算法和线路出口故障方向判别元件的基础上提出了新型线路保护方案, 整体的保护流程如图 3 所示。

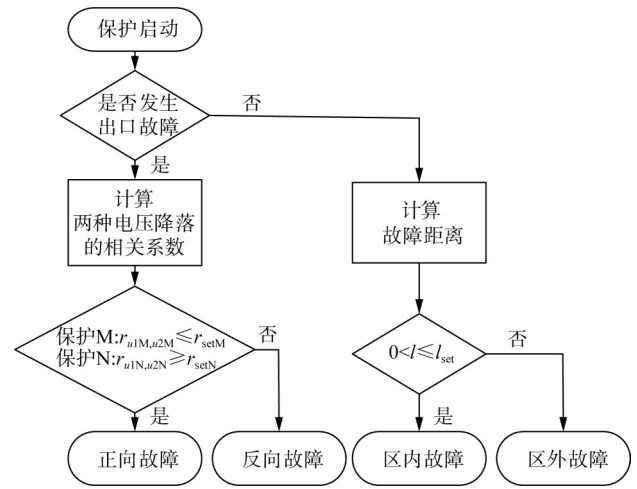


图3 保护流程

Fig. 3 Process of relay protection

在保护启动后, 首先需要通过低电压元件比较故障残压和整定值, 判断故障是否发生在线路保护出口附近。低电压元件的判据如下。

$$k_{\Sigma} < k_{\text{low}} \quad (15)$$

$$k_{\Sigma} = \frac{U_{\Sigma}}{U_{e\Sigma}} \quad (16)$$

$$U_{\Sigma} = \frac{2\pi}{N_s} \sum_{i=1}^D |u_p(i)| \quad (17)$$

式中: k_{Σ} 为 U_{Σ} 与 $U_{e\Sigma}$ 的比值; k_{low} 为低电压门槛; $u_p(i)$ 为第 i 时刻保护安装处电压的采样值; N_s 为一个周波内的采样点数量; D 为一个数据窗内的采样点数量; U_{Σ} 为 $u_p(i)$ 在故障后一个数据窗内电压瞬时值绝对值的积分值, 单相接地故障的情况下选取对应故障相相电压进行计算, 其他故障情况下选取对应故障相的相间电压; $U_{e\Sigma}$ 为一个周波内选取额定电压作为积分量, 采用滑动数据窗计算得到的积分值最小值。

若发生线路保护出口附近的故障, 通过计算两

种电压降落波形的相关系数来判断出口故障方向; 若发生故障且故障点不在保护出口附近, 通过等传变快速距离保护算法计算故障距离, 与整定距离比较, 判断是否发生区内故障。

3 仿真验证与分析

为了进一步验证该保护方案的适应性, 在 PSCAD/EMTDC 中建立典型的含分布式新能源的高压电网模型, 系统结构如图 1 所示。主要参数如下: 交流母线额定电压为 110 kV; 交流系统等值阻抗 $Z_N=(0.487+4.128)\Omega$; 送出线路长度 $L=20$ km, 线路详细参数如表 1 所示。

表 1 送出线路的详细参数

Tab. 1 Detailed parameters of the fed-out lines

参数	电阻/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	电抗/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	电容/ $(\text{M}\Omega \cdot \text{m})$
正序参数	0.087 030 300	0.352 584 277	215.154 3
零序参数	0.332 500 329	0.884 807 956	365.928 6

在本仿真实验中, 采样率为 4 kHz, 采用二阶巴特沃斯低通滤波器, 截止频率为 200 Hz。

3.1 低电压元件测试

为了验证低电压元件的动作特性, 分别在线路新能源侧保护近区与线路系统侧保护近区进行仿真测试。数据窗长度选取为 5 ms, 低电压门槛 k_{low} 取 0.1。选取保护安装处 M 反向出口为故障点 K1, 线路距 M 点 5% 线路长度处为故障点 K2, 保护安装处 N 反向出口为故障点 K4, 线路距 N 点 5% 线路长度处为故障点 K3, 发生金属性故障时的仿真结果如表 2 所示。由表 2 测试结果可知, 保护近区发生严重故障下, k_{Σ} 均小于门槛值 k_{low} , 即本文所提低电压元件在保护近区故障时能够可靠动作, 不受故障类型影响。

3.2 故障测距元件测试

本仿真实验选择数据窗长度 5 ms, 为了受到避

表 2 低电压元件的动作结果

Tab. 2 Results of low voltage components

故障位置		不同故障类型下的 k_{Σ}			
		AG	AB	ABG	ABC
线路 新能源侧	反向 K1	0	0	0	0
	正向 K2	0.037	0.031	0.031	0.031
线路 系统侧	反向 K4	0	0	0	0
	正向 K3	0.084	0.085	0.085	0.085

免故障前数据的影响, 采用故障后 5 ms 的数据计算第一个故障距离, 然后随着采样点更新计算新的故障距离。为了确保结果的可靠性, 连续 20 个点满足故障判据则认为是区内故障。整定距离 I 段 $I_{\text{set}}=0.8 \cdot L$ 。

当线路非保护出口附近发生故障, 如图 2 所示, 故障点为 K。以故障位置 $\alpha=0.3$, 故障起始时间是 0.485 s, 故障类型是单相故障, 分布式电源是 30 MW 直驱风机为例, 分别采用基于 R-L 模型的时域微分方程算法和等传变快速距离保护算法, 仿真结果如图 4 所示。

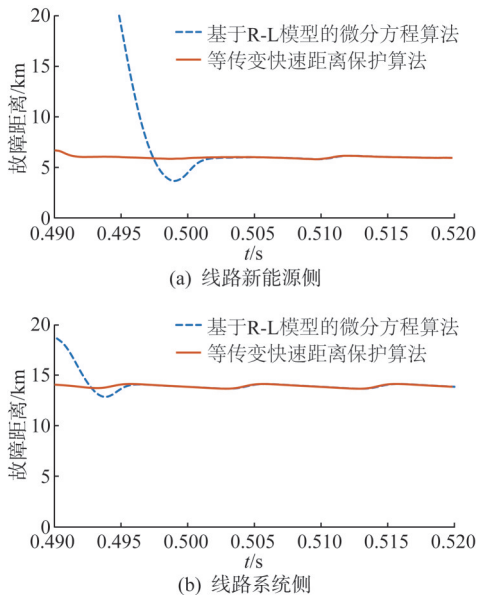


图 4 不同算法下的仿真结果

Fig. 4 Simulation results with different algorithms

由图 4 可知, 相比于基于 R-L 模型的时域微分方程算法, 等传变快速距离保护算法可以更加快速准确地求解故障距离。当故障点位于线路的不同位置时采用等传变快速距离保护算法的结果如图 5 所示。

由此可知, 该方法可以适应新能源电源接入, 能在较短时间内准确计算出故障距离, 实现保护的快速动作。当分布式电源的类型及容量和故障类型不同时保护动作结果如表 3—5 所示, 故障点均为线路中点。仿真结果表明, 等传变快速距离保护算法能够快速准确地判断出区内故障, 不受分布式电源类型、容量以及故障类型影响。

为了进一步分析过渡电阻对保护特性带来的影响, 设置不同大小的过渡电阻进行仿真测试。当线

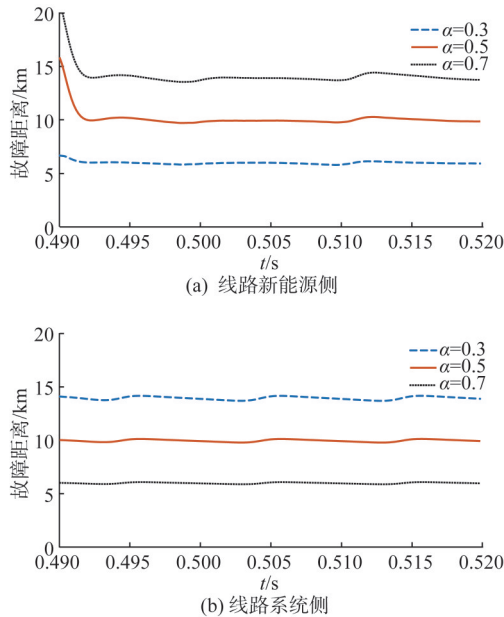


图5 不同故障位置下的仿真结果

Fig. 5 Simulation results at different fault locations

表3 光伏电源接入时故障测距元件动作结果

Tab. 3 Active results of distance relays when PV power supply is connected

分布式电源	故障类型	动作时间/ms	
		保护装置 M	保护装置 N
5 MW 光伏机组	AG	10.0	10.0
	AB	10.0	10.0
	ABG	10.0	10.0
	ABCG	10.0	10.0
30 MW 光伏机组	AG	10.0	10.0
	AB	10.0	10.0
	ABG	10.0	10.0
	ABCG	10.0	10.0

表4 直驱风机接入时故障测距元件动作结果

Tab. 4 Active results of distance relays when PMSG is connected

分布式电源	故障类型	动作时间/ms	
		保护装置 M	保护装置 N
5 MW 直驱风机	AG	10.0	10.0
	AB	10.0	10.0
	ABG	10.0	10.0
	ABCG	10.0	10.0
30 MW 直驱风机	AG	10.0	10.0
	AB	10.0	10.0
	ABG	10.0	10.0
	ABCG	10.0	10.0

表5 双馈风机接入时故障测距元件动作结果

Tab. 5 Active results of distance relays when DFBG is connected

分布式电源	故障类型	动作时间/ms	
		保护装置 M	保护装置 N
5 MW 双馈风机	AG	10.0	10.0
	AB	10.0	10.0
	ABG	10.0	10.0
	ABCG	10.0	10.0
30 MW 双馈风机	AG	10.0	10.0
	AB	10.0	10.0
	ABG	10.0	10.0
	ABCG	10.0	10.0

路上发生区外故障时保护能够可靠不动作；当线路上发生区内故障时保护动作结果如表6所示，保护可以准确地判断出区内故障，表明等传变快速距离保护算法具有一定耐受过渡电阻的能力。

表6 不同过渡电阻时故障测距元件动作结果

Tab. 6 Active results of distance relays with different transition resistances

故障类型	过渡电阻/ Ω	动作时间/ms	
		保护装置 M	保护装置 N
AG	1	10.0	10.0
	5	10.0	10.0
	15	10.0	10.0
	30	10.0	10.0
AB	1	10.0	10.0
	5	10.0	10.0
	15	10.0	10.0
	30	10.0	10.0
ABG	1	10.0	10.0
	5	10.0	10.0
	15	10.0	10.0
	30	10.0	10.0
ABCG	1	10.0	10.0
	5	10.0	10.0
	15	10.0	10.0
	30	10.0	10.0

3.3 故障方向判别元件测试

本仿真实验选择数据窗长度为2 ms，从故障后开始计算。为避免故障前数据影响，将利用故障后2 ms内数据得到的相关系数 $r_{u1, u2}$ 计算值作为初始判断点，随采样点更新相关系数计算值，连续4个

点满足方向判据则认为是正向故障。考虑到线路阻抗和系统等值阻抗的参数误差, 将波形相关系数门槛值设为 $r_{\text{setM}}=r_{\text{setN}}=0.5$ 。

3.3.1 故障点位于线路新能源侧出口

当线路新能源侧保护出口附近发生故障, 如图 2 所示, 正向故障对应故障点为 K2, 反向故障对应故障点为 K1。以故障时间为 0.485 s、故障类型是单相故障、分布式电源为 5 MW 的直驱风机为例, 仿真结果如图 6 所示。

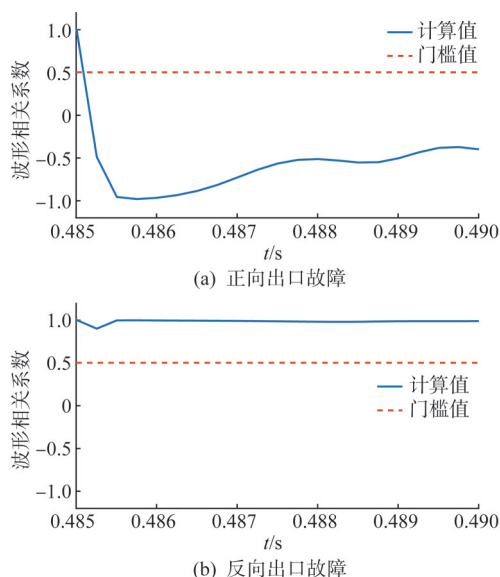


图 6 线路新能源侧出口故障仿真结果

Fig. 6 Simulation results of the outlet fault on the new energy side

表 7 线路新能源侧方向元件动作特性

Tab. 7 Active characteristics of directional relay on the new energy side

故障位置	故障类型	相关系数 $r_{u1M, u2M}$		动作时间/ms
		30 MW 直驱风机	30 MW 双馈风机	
K1	AG	0.989	0.993	NO
	AB	0.988	0.990	NO
	ABG	0.988	0.990	NO
	ABC	0.988	0.990	NO
K2	AG	-0.833	-0.779	3.0
	AB	-0.718	-0.689	3.0
	ABG	-0.720	-0.691	3.0
	ABC	-0.728	-0.695	3.0

注: NO 表示不动作, 下同。

由测量电压降 $u_{1M}(t)$ 和计算电压降 $u_{2M}(t)$ 的相关系数变化规律, 二者在正向出口故障时变化趋势

明显不同, 在反向出口故障时变化趋势基本一致。为了进一步验证该方向元件的可靠性, 当接入不同类型分布式电源时, 在不同故障类型下线路新能源侧方向元件动作结果如表 7 所示。表中的相关系数 $r_{u1M, u2M}$ 为利用故障后 2 ms 内数据得到的计算值。仿真结果表明, 该方向元件在不同类型分布式电源下、在不同故障类型下均能准确识别线路新能源侧出口故障方向。

3.3.2 故障点位于线路交流系统侧出口

当线路系统侧保护出口附近发生故障, 如图 2 所示, 正向故障对应故障点为 K3, 反向故障对应故障点为 K4。以故障时间为 0.485 s、故障类型为单相故障、分布式电源为 5 MW 的直驱风机为例, 仿真结果如图 7 所示。

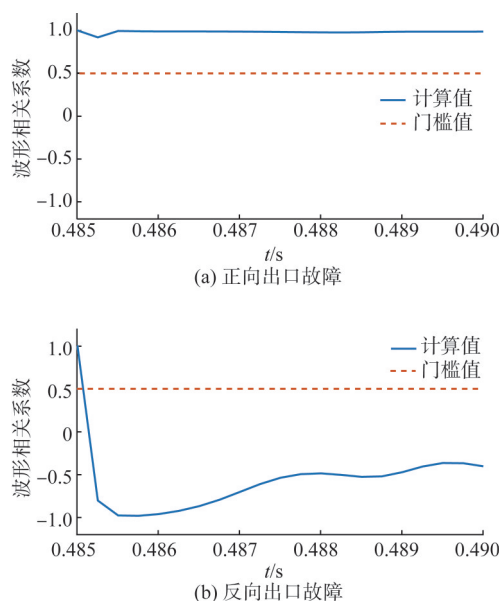


图 7 线路系统侧出口故障仿真结果

Fig. 7 Simulation results for the outlet fault on the system side

由测量电压降 $u_{1N}(t)$ 和计算电压降 $u_{2N}(t)$ 的相关系数变化规律, 二者在反向出口故障时变化趋势明显不同, 在正向出口故障时变化趋势基本一致。为了进一步验证该方向元件的可靠性, 当接入不同类型分布式电源时, 在不同故障类型下线路系统侧方向元件动作结果如表 8 所示。表 8 中的相关系数 $r_{u1N, u2N}$ 为利用故障后 2 ms 内数据得到的计算值。仿真结果表明, 该方向元件在不同类型分布式电源下、在不同故障类型下均能准确识别线路系统侧出口故障方向。

表 8 线路系统侧方向元件动作特性

Tab. 8 Active characteristics of directional relay on the system

故障位置	故障类型	相关系数 $r_{u1N,u2N}$		动作时间 /ms
		30 MW 直驱风机	30 MW 双馈风机	
K3	AG	0.988	0.989	NO
	AB	0.986	0.986	NO
	ABG	0.986	0.986	NO
	ABC	0.986	0.986	NO
K4	AG	-0.741	-0.641	3.0
	AB	-0.697	-0.601	3.0
	ABG	-0.698	-0.609	3.0
	ABC	-0.703	-0.613	3.0

4 结论

对于含分布式新能源电源的交流系统, 由于新能源电源故障特性复杂, 与同步发电机差异很大, 传统的线路保护方案不再适用。基于此, 本文提出了一种针对含分布式新能源高压电网送出线路的新型线路保护方案, 通过理论分析和仿真实验得到如下结论。

1) 若故障点不在线路保护出口附近, 等传变快速距离保护算法相比于时域微分方程算法没有“暂态超越”现象, 可以更加准确地求解故障距离。

2) 若故障点位于线路保护出口附近, 利用测量电压降和计算电压降变化趋势的一致性来判断故障方向。对于线路新能源侧, 反向出口故障时两种电压降变化趋势具有一致性, 正向出口故障时两种电压降变化趋势不具有 consistency; 对于线路系统侧, 结论相反。

3) 该线路保护方案不受分布式新能源电源种类、容量及复杂故障特性的影响, 能够快速准确判断出各种类型的线路故障。

参考文献

- [1] 孙云莲, 杨成月, 胡雯. 新能源及分布式发电技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 张海龙. 中国新能源发展研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [3] 黄雨涵, 丁涛, 李雨婷, 等. 碳中和背景下电源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 28-51.
HUANG Yuhuan, DING Tao, LI Yuting, et al. A review of energy decarbonization technologies in the context of carbon neutrality and implications for the development of new power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 28-51.
- [4] 张勇. 分布式发电对电网继电保护的影响综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(2): 145-151.
ZHANG Yong. A review of the impact of distributed generation on grid relay protection [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2010, 22(2): 145-151.
- [5] 吕华. 分布式电源对配电网保护影响研究及改进 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [6] 宋国兵, 陶然, 李斌, 等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 2-12.
SONG Guobing, TAO Ran, LI Bin, et al. A review of fault analysis and protection of power systems containing large-scale power electronic equipment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12.
- [7] 王晨清, 宋国兵, 迟永宁, 等. 风电系统故障特征分析 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 52-58.
WANG Chenqing, SONG Guobing, CHI Yongning, et al. Fault characterization of wind power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 52-58.
- [8] 黄涛, 陆于平, 蔡超. DFIG 等效序突变量阻抗相角特征对故障分量方向元件的影响分析 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3929-3940.
HUANG Tao, LU Yupin, Cai Cao. Analysis of the influence of DFIG equivalent sequence mutation quantity impedance phase angle characteristics on the fault component directional elements [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3929-3940.
- [9] 王晨清, 宋国兵, 汤海雁, 等. 距离保护在风电接入系统中的适应性分析 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 10-15.
WANG Chenqing, SONG Guobing, TANG Haiyan, et al. Adaptation analysis of distance protection in wind power access system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 10-15.
- [10] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 逆变型电源对距离保护的影响机理分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 54-59.
LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Mechanistic analysis of the influence of inverter-type power supply on distance protection [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 54-59.
- [11] 陈洁羽, 谈震, 刘俊, 等. 风电电源阻抗特性对相量式距离保护的影响分析 [J]. 智慧电力, 2018, 46(12): 63-68.
CHEN Jieyu, TAN Zhen, LIU Jun, et al. Analysis of the impact of wind power supply impedance characteristics on phase-volume distance protection [J]. Smart Power, 2018, 46(12): 63-68.
- [12] 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. Impact of inverter-type distributed power supply access on ground distance protection and countermeasures [J]. Smart Power, 2023, 51(1): 46-53.
- [13] GUPTA P, MAHANTY R N. Transmission line protection by wavelet analysis [J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2016, 11(9): 6297-6304.
- [14] 张艳霞, LI K K. 基于微分方程的自适应窗长距离保护算法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 25-28, 34.
ZHANG Yanxia, LI K K. Research on long distance protection algorithm based on differential equation with adaptive window [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 25-

- 28,34.
- [15] 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. Research on distance protection based on R-L model algorithm with PSCAD simulation [J]. Journal of Electric Power, 2010, 25(2):167-170.
- [16] 文明浩, 陈德树, 尹项根. 超高压线路等传变快速距离保护[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4):145-150.
WEN Minghao, CHEN Deshu, YIN Xianggen. Fast distance protection of EHV lines with equal transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4):145-150.
- [17] 文明浩, 王玉玺, 陈玉, 等. 基于等传变原理的高压交流输电线路继电保护[J]. 智慧电力, 2019, 47(12):22-29.
WEN Minghao, WANG Yuxi, CHEN Yu, et al. Relay protection for high-voltage AC transmission lines based on isotransfer principle [J]. Smart Power, 2019, 47(12):22-29.
- [18] 戚宣威, 李宝伟, 董新涛, 等. 基于等传变思路的超高速输电线路保护研究与开发[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20):178-187.
QI Xuanwei, LI Baowei, DONG Xintao, et al. Research and development of ultra-high-speed transmission line protection based on isotransduction idea [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20):178-187.
- [19] JIA Ke, ZHE Yang, YU Fang, et al. Influence of inverter-interfaced renewable energy generators on directional relay and an improved scheme [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12):11843-11855.
- [20] 陈玉, 文明浩, 王桢, 等. 基于低频电气量的超高压交流线路出口故障快速保护[J]. 电工技术学报, 2020, 35(11):2415-2426.
CHEN Yu, WEN Minghao, WANG Zhen, et al. Fast protection of EHV AC line outlet faults based on low-frequency electrical quantities [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(11):2415-2426.
- [21] WANG Yuxi, WEN Minghao, CHEN Yu. A novel directional element for transmission line connecting inverter-interfaced renewable energy power plant [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023(145):15-23.
- [22] 吕健勇, 杜文娟, 陈珏. 双馈风电机组锁相环动态主导的小干扰稳定极限[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3):72-82.
LÜ Jianyong, DU Wenjuan, CHEN Jue. Small disturbance stability limit dynamically dominated by phase-locked loop of doubly-fed wind turbine [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3):72-82.
- [23] 令狐桐雯, 韩民晓, 霍启迪, 等. 考虑不同故障穿越模式的双馈风电场短路电流计算等值建模[J]. 南方电网技术, 2022, 16(10):28-37.
LINGHU Tongwen, HAN MinXiao, HUO Qidi, et al. Equivalent modeling of doubly-fed wind farms short-circuit current calculation considering different fault ride-through modes [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(10):28-37.
- [24] 薛飞, 李宏强, 李旭涛, 等. 基于 LSTM 神经网络的双馈风机控制参数辨识方法[J]. 中国电力, 2023, 56(6):31-39.
XUE Fei, LI Hongqiang, LI Xutao, et al. Identification method for control parameters of doubly-fed induction generator based on LSTM neural network [J]. Electric Power, 2023, 56(6):31-39.
- [25] 欧阳金鑫, 熊小伏. 双馈风力发电系统电磁暂态分析[M]. 北京: 科学出版社, 2018.

收稿日期: 2023-05-28; 网络首发日期: 2024-03-15

作者简介:

卢正飞(1986), 男, 高级工程师, 学士, 研究方向为电力系统继电保护, wolffigo@126.com;

蒋焘(1999), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护, 2213867102@qq.com;

黄福全(1973), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护, huangfuquan@sz.csg.cn.