

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210701

计及对端系统参数和送出线路分布参数影响的 风电系统时域距离保护

侯俊杰¹, 宋国兵¹, 常鹏¹, 常娜娜¹, 李新东², 吴丹²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106)

摘要: 为解决现有时域距离保护在风电并网系统长线距离 I 段末端发生高阻接地故障时存在的局限性, 在分布参数模型的基础上计及对端系统参数, 提出了一种适用于风电系统长线的时域距离保护新原理。讨论了现有时域距离保护在长线影响和对端系统影响下的保护性能。在计及长线的分布参数效应的基础上, 将近端电气量归算至长线距离 I 末端补偿点。在补偿点与故障支路之间构建计及对端系统参数的时域故障回路方程, 联立方程获得故障发生位置。结合保护整定值, 实现距离保护判据。仿真结果表明, 提出的保护原理考虑了长线分布参数影响适应于较长的送出线路。另外, 考虑了对端系统影响, 当长线距离 I 段末端发生 300 Ω 过渡电阻接地故障时, 保护仍能正确动作, 受采样率等干扰因素影响较小。

关键词: 风电系统; 时域; 距离保护; 对端系统; 分布参数模型

Time-domain distance protection for a wind power system considering parameters of the remote end system and influence of outgoing line distribution parameters

HOU Junjie¹, SONG Guobing¹, CHANG Peng¹, CHANG Nana¹, LI Xindong², WU Dan²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd.), Nanjing 211106, China)

Abstract: There is a problem of the limits of existing time-domain distance protection when it comes to a grounding fault with high fault resistance occurring at the end of distance section I in a wind power system long transmission line. This paper presents a time-domain distance protection algorithm for a wind power system long line based on the distributed parameter model and the remote end system parameters. The performance of existing time-domain distance protection under the influences of a long line and remote-end system are discussed. Taking into account the distributed parameter effect of the long line, the near-end electrical quantity is calculated to the compensation point at the end of section I on the long line. The time-domain fault loop equation considering the parameters of the remote end system is constructed between the compensation point and the fault branch, and the fault location is obtained by calculating equations. Combined with the protection setting value, the distance protection criterion is realized. Simulation results show that the proposed protection principle considers the influence of a long line distribution parameters and is suitable for long transmission lines. In addition, when a grounding fault with 300 Ω fault impedance occurs at the end of section I for a long line, the protection can still operate correctly by considering the impact on the end system and is less affected by interference factors such as sampling rate.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5100-202040327A-0-0-00).

Key words: wind power system; time-domain; distance protection; system from remote end; distributed parameter model

0 引言

考虑到风电规模化接入引发的异于常规能源的

拓扑结构与故障特征^[1-3], 当面向传统电源的继电保护直接用于风电并网系统时, 保护性能将受到较大影响。距离保护作为较高电压等级线路保护对于维护系统的可靠性发挥着重要作用。但相关研究表明: 当线路发生故障时, 风电侧输出电气量存在频率偏移, 传统工频量保护难以适用^[4-5]; 且受风电系统换

流器控制策略的影响, 风机系统的等值正负序阻抗存在较大差异, 传统工频变化量保护的适用条件难以满足^[6-8]。

针对常规距离保护在风电并网系统存在性能下降问题, 已有文献提出了一系列新型保护原理。时域距离保护原理基于被保护元件的参数信息构建参数识别方程, 并在时域中求解故障信息, 实现故障识别。该原理本身不受风电机组控制策略和外特性影响, 性能较好^[9-16]。具体包括:

1) 针对对端系统影响

文献[10-12]对系统两侧阻抗角进行假设, 在此基础上构造包含电阻和电感的集中线路参数方程, 实现故障判别。但原理存在假设, 对于高阻故障仍存在原理误差。文献[13-14]提出了一种基于实测数据的双馈风电场集电线时域距离保护, 但保护原理引入了对端电压、电流信息。同时, 当线路较长时, 其保护性能仍待探究。为解决过渡电阻影响, 消除假设带来的误差, 文献[15]将故障支路之后等效为阻感模型, 建立包含线路故障信息的故障回路方程。但该原理未考虑长线故障影响, 当被保护区域外发生故障时, 仍有暂态超越的风险, 存在一定局限性。

2) 针对长线对保护的影响

文献[16]基于故障分量的沿线电压分布特征, 在短时间内实现故障甄别, 但原理无法长时间投入, 易受风电侧电源特性影响。文献[17]研究了一种计及分布参数效应的距离保护算法, 该算法将补偿点设置在中点, 因此当长线中被保护区域外故障时, 保护性能将降低。同时该原理对于两侧系统阻抗角进行了假设, 在抗过渡电阻性能方面仍存在一定的局限性。

上述针对风电接入系统的时域距离保护原理分别在过渡电阻影响方面和长线分布参数效应影响方面提出了改进思路。但上述原理未同时考虑以上两点因素的影响, 当长距离线路末端发生高阻接地故障时, 仍存在不正确动作的风险, 因此需要进一步展开研究。

文中考虑长线影响, 利用分布参数线路模型补偿至线路末端, 进一步减少故障发生在末端时的暂态超越现象。在补偿点与故障支路之间构建计及远端系统参数的时域故障回路方程。联立时域线路参数方程获得故障发生位置, 结合保护整定值, 实现长线故障的识别。通过系统仿真建模及算法编程验证可行性。

1 现有风电系统时域距离保护性能分析

1.1 对端系统影响

图1为双端系统故障时电路等效图, $u_1(t)$ 、 $i_1(t)$

为 m 端的电压和电流; $u_2(t)$ 、 $i_2(t)$ 为 n 端的电压和电流; $i_f(t)$ 表示流入故障支路的短路电流; R 、 L 表示 m 端与故障点之间的电阻和电感; R_f 表示故障支路的过渡电阻。

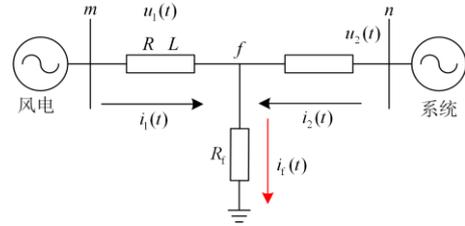


图1 电路等效图

Fig. 1 Circuit equivalent diagram

由图1可知, 风电侧距故障支路的计算公式可表示为

$$u_1(t) = R_f i_1(t) + L \frac{di_1(t)}{dt} + i_f(t) R_f \quad (1)$$

式(1)表示为

$$u_1(t) = L \left[\frac{r}{l} i_1(t) + \frac{di_1(t)}{dt} \right] + i_f(t) R_f = L \left[\frac{r}{l} i_1(t) + \frac{di_1(t)}{dt} \right] + (i_1(t) + i_2(t)) R_f \quad (2)$$

式中, r 和 l 分别为风电并网系统长线单位长度下的电阻和电感参数。

结合图1和式(2), 当过渡电阻不为0时, 由于对端系统的助增作用, 方程式(2)存在包含对端系统参数等4个未知量。当采用单端测距式原理时, 由于对端系统提供的电流 $i_2(t)$ 无法直接获得, 为此文献[10-12, 17]对两侧系统阻抗角进行假设, 近似认为其相等。以单相接地故障进行说明, 此时 $i_f(t)$ 可近似等效。

$$i_f(t) = i_1(t) + i_2(t) = k i_0(t) \quad (3)$$

式中: $i_0(t)$ 表示由 $i_1(t)$ 间接获得的零序分量; k 为实数。

此时, 将式(3)代入式(2)后, 则有

$$u_1(t) = L \left[\frac{r}{l} i_1(t) + \frac{di_1(t)}{dt} \right] + i_0 R_f' \quad (4)$$

式中, R_f' 为等效故障支路阻抗, 其中 $R_f' = k R_f$ 。此时, 对端系统参数被消掉, 式(4)中仅含2个未知量, 方程式(4)为二元一次方程组, 理论上两组电压、电流即可求解故障距离。

但实际上 $i_0(t)$ 与 $i_f(t)$ 存在一定的相位差, 使得式(3)中的 k 不再为实数, 则有

$$i_f(t) = i_1(t) + i_2(t) \neq k i_0(t) \quad (5)$$

由式(3)可知, 在原有假设中, k 为实数, 但应

用于式(4)时将不再满足,求解结果可能存在较大误差。对于风电系统侧,考虑规模化风电送出,因此为送端系统。受对端系统助增影响, $i_1(t)$ 超前 $i_2(t)$, 测量阻抗呈现容性, 此时易发生稳态超越现象, 保护易发生误动现象。

为此,文献[13-14]提出了利用实测值的时域距离保护,即将式(2)远端电流进行实测获得。但根据实际工程中单端量距离保护原理可知,对侧电流无法测得,因此仍然无法从原理上解决对端系统的故障电流助增问题。文献[15]计及故障支路后的线路模型列写了线路参数方程,然而原理本身未考虑分布参数效应,适应性有待进一步研究。

1.2 长线分布电容的影响

由式(1)可知,文献[10-15]所提方法基于集中线路参数模型,适用于短距离线路,但考虑规模化风电系统的接入后,势必增加输送容量和输送距离。其分布参数效应如图2所示。

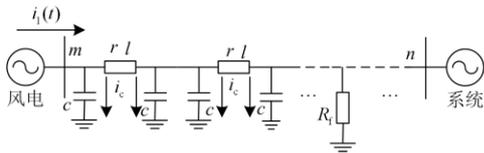


图2 分布参数线路模型

Fig. 2 Distributed parameter line model

图2中, c 为输电线路单位长度下的电容参数, i_c 为电容对地放电电流。

原有基于集中参数模型的保护原理^[10-15]为减小模型误差影响,引入低通滤波进行电气量信息的预处理,以减少分布电容影响,适用于较短线路。但随着线路的逐渐增长,分布电容电流的影响将无法忽略。由图2可知,受长线的分布参数效应影响,在末端发生故障时,由于存在故障对地支路,因此由保护安装处到故障点之间存在对地放电回路,此时若仍利用式(4)进行方程求解,将存在较大误差,原有集中参数模型的保护原理性能下降。

为此文献[17]构建了计及长线影响的时域距离保护原理。计及长线因素影响,将补偿点选在线路中点,如图3所示。

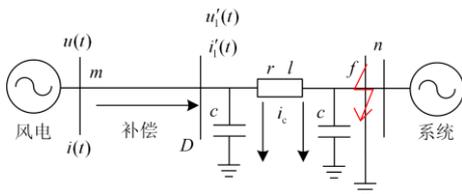


图3 区内末端故障

Fig. 3 Internal fault occurs at remote terminal

图3中, D 为补偿点, $u'(t)$ 和 $i'(t)$ 为长线沿线分布规律下由近端 m 处归算至补偿点的电气量。

由图3可知,当风电系统线路较长时,虽然将补偿点设置在中点已经在一定程度上减少了末端故障暂态超越的可能性。但从补偿点到故障支路的计算仍然采用集中参数下的线路模型,在长线末端发生高阻接地故障时,保护存在不正确动作的风险。

1.3 小结

上述原理针对对端系统影响和长线分布参数效应的研究,已有一定进展。但未同时考虑以上两点因素影响,在长距离线路末端发生高阻接地故障时存在不正确动作的风险,需要进一步展开研究。因此文中针对风电系统长距离输电线路,提出了计及对端系统参数和分布参数影响的时域距离保护。

2 保护原理的基本理论

2.1 分布参数模型的引入

考虑时域距离保护原理^[10-15]在长线中的局限性,本文在文献[17]的基础上引入分布参数模型。即由 m 端补偿至距离 l 段末端,然后利用补偿点的电气量信息计算其与故障支路的距离。考虑文献[17]将补偿点设置为线路中点,在一定程度上减少长线分布参数效应的影响。然而当线路较长,且系统发生距离 l 线路区外故障时,该保护原理的性能有待探究。为进一步减少长距离线路末端的暂态超越风险,本文将补偿点设定为距离 l 段末端。

其对应的双曲函数下的分布参数模型可表示为^[18]

$$U_{(x)} = U_m \cosh(\gamma x) - I_m Z_c \sinh(\gamma x) \quad (6)$$

式中: γ 为输电线路的传输系数; Z_c 为波速阻抗。引入欧拉公式后,式(6)可进一步表示为

$$U_{(x)} = U_m \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) - j I_m Z_c \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \quad (7)$$

式中: λ 为波长; x 为 m 端至任意点的距离。

对于 50 Hz 的工频量来说,其对应的波长 $\lambda = 6000 \text{ km}$, 因此输电线路中沿线电压幅值实际分布为数千公里级的周期曲线,而现存的输电线路长度主要为百公里级,沿线电压幅值的分布周期相比较短。以长度为 300 km 的交流传输线为例,式(7)中 $\cos(2\pi x/\lambda)$ 和 $\sin(2\pi x/\lambda)$ 随 x 的变化曲线如图4所示。

由图4可知,对于 50 Hz 的工频量和 300 km 的交流传输线, $\cos(2\pi x/\lambda)$ 的取值最小为 0.951, 而 $\sin(2\pi x/\lambda)$ 的取值始终接近 $2\pi x/\lambda$ 。根据等价无穷小定理,上述两项可以近似为

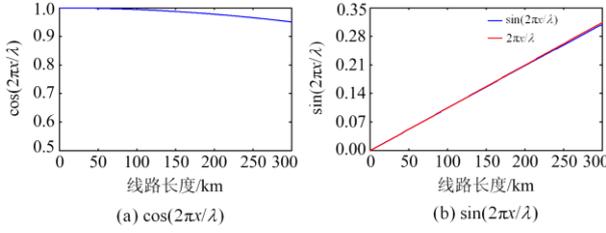


图4 函数项随线路长度变化图

Fig. 4 Graph of the variation of the function term with the length of the line

$$\begin{cases} \cos(\frac{2\pi}{\lambda}x) \approx 1 \\ \sin(\frac{2\pi}{\lambda}x) \approx \frac{2\pi}{\lambda}x \end{cases} \quad (8)$$

此时式(7)可进一步表示为

$$U_{(x)} = U_m - jI_m Z_c \left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) = U_m - jI_m k_1 x \quad (9)$$

式中, k_1 为等效系数, $k_1 = 2Z_c \pi / \lambda$ 。

以距离 I 段区外发生金属性接地故障为例, 由首端 m 计算至距离 I 段末端补偿点 p 时, 整定点处的电压幅值可表示为

$$|U_{(p)}| = |U_m - jI_m k_1 L_1| > |U_{(f)}| \quad (10)$$

式中, L_1 为 m 端至补偿点的距离。

从式(10)可以看出, 由 m 端计算至补偿点 p 时, 其幅值逐渐降低。由于故障点处为金属性接地故障, 因此 $U_{(f)}$ 电压为 0, 故由补偿点计算至故障点时达到最小值。在补偿点和故障点处的等效向量图和电压沿线分布特征如图 5 所示。

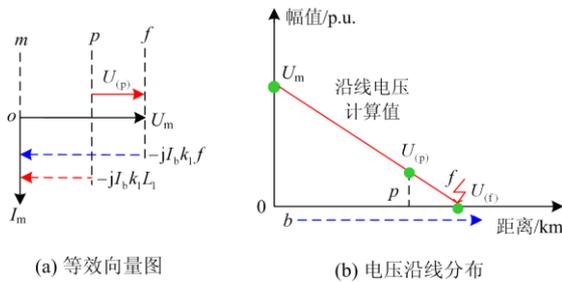


图5 区外故障等效图

Fig. 5 Equivalent diagram of external fault

由于长距离线路暂态超越现象主要发生在距离 I 段末端, 因此文中将补偿点设置为距离 I 段末端。针对区外故障, 考虑到 m 点至补偿点 p 处不存在故障支路, 因此两端点之间严格满足电压的沿线分布规律^[18]。由 m 点归算至补偿点 p 的电气量符合真实测量值。因此在较大程度上克服了 I 段区外故障时的暂态超越现象。

同理可得, 对于距离 I 区内发生金属性接地故

障, 在补偿点和故障点处的等效向量图和电压沿线分布特征如图 6 所示。

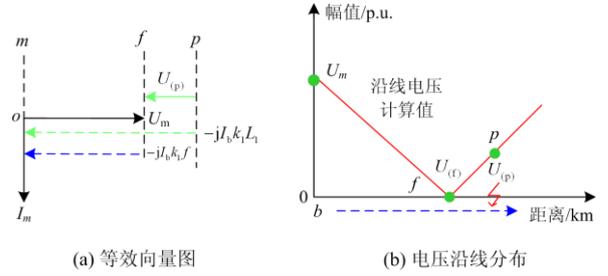


图6 区内故障等效图

Fig. 6 Equivalent diagram of internal fault

由图 6 可知, 当发生区内故障时, 由于近端 m 至补偿点处存在故障支路, 因此两点之间的沿线电压分布规律将在故障支路附近被破坏。由近端计算至补偿点的电压相位将在故障支路发生突变。

当距离 I 区内发生过渡电阻接地故障时, 考虑规模化风电一般为送端系统, 风电侧 m 端电流的相位超前电网侧 n 端。和金属性故障的分析过程相似, 当距离 I 段发生区内故障时, 由近端计算至补偿点的电压相位将在故障支路附近突变^[17-18]。

考虑线路损耗及时域下算法运算速度较快等因素, 则式(6)的时域长线参数效应的沿线电气量计算公式如式(11)、式(12)所示。

$$\begin{aligned} i_1'(L_1, t) = & \frac{1}{2Z_c} \left[\frac{Z_c + rL_1}{4} \right] \left[u_1(t + \frac{L_1}{v}) - i_1(t + \frac{L_1}{v})(Z_c + \frac{rL_1}{4}) \right] - \\ & \frac{1}{2Z_c} \left[\frac{Z_c - rL_1}{4} \right] \left[u_1(t - \frac{L_1}{v}) - i_1(t - \frac{L_1}{v})(Z_c - \frac{rL_1}{4}) \right] - \\ & \frac{1}{2Z_c} \frac{rL_1}{2Z_c} \left[u_1(t) - i_1(t) \frac{rL_1}{4} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} u_1'(L_1, t) = & \frac{1}{2} \left[\frac{Z_c + rL_1}{4} \right]^2 \left[u_1(t + \frac{L_1}{v}) - i_1(t + \frac{L_1}{v})(Z_c + \frac{rL_1}{4}) \right] + \\ & \frac{1}{2} \left[\frac{Z_c - rL_1}{4} \right]^2 \left[u_1(t - \frac{L_1}{v}) + i_1(t - \frac{L_1}{v})(Z_c - \frac{rL_1}{4}) \right] - \\ & \left(\frac{rL_1}{4Z_c} \right)^2 u_1(t) - \frac{rL_1}{4} \left[\frac{Z_c + rL_1}{4} \right] \left[\frac{Z_c - rL_1}{4} \right] i_1(t) \end{aligned} \quad (12)$$

式中： $u_1(t)$ 、 $i_1(t)$ 分别为风电并网系统侧的电压和电流； v 为波速。

2.2 计及对端系统的长线时域距离方程

图 7 为距离 I 段区外故障的故障等效电路。图中 m 端到距离 I 段末端计及了长线参数影响。为分析 I 段区外故障的暂态超越现象，以 I 段区外故障为例。

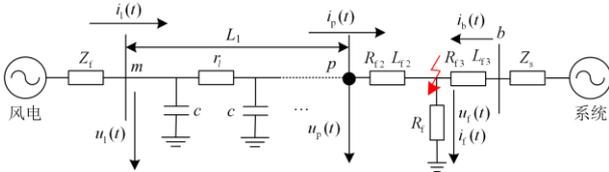


图 7 故障发生在距离保护 I 段区外的等效网络
Fig.7 Equivalent network where the fault occurs external zone of section I

图 7 补偿点 p 电压 $u_p(t)$ 、电流 $i_p(t)$ 由式(11)和式(12)计算获得。补偿点选择距离 I 段末端； R_{f2} 和 L_{f2} 为 p 点与故障点之间的正序阻感参数； Z_f 和 Z_s 为风电侧及电网侧的等值背侧阻抗； R_{f3} 和 L_{f3} 为故障支路距 b 端系统的等效电阻和电感。

以 A 相接地故障为例。 p 点到对端系统的零序网络如图 8 所示。

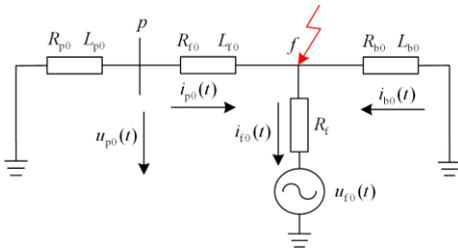


图 8 零序分量网络等效图

Fig. 8 Equivalent diagram of zero-sequence component network

图 8 中，故障支路之后等效为电阻 R_{b0} 和电感 L_{b0} 。补偿点 p 背侧零序等效阻感参数可表示为 R_{p0} 、 L_{p0} 。补偿点 p 处的零序电压、电流可分别表示为 $u_{p0}(t)$ 、 $i_{p0}(t)$ 。 $i_{b0}(t)$ 表示远端系统提供的零序电流。 $i_{f0}(t)$ 、 $u_{f0}(t)$ 分别表示故障支路的零序电流和电压。根据边界条件， $i_f(t)$ 可用式(13)表示。

$$i_f(t) = \frac{u_f(t)}{R_f} = 3(i_{p0}(t) + i_{b0}(t)) \quad (13)$$

则远端流入故障支路的故障分量电流 $i_{b0}(t)$ 为

$$i_{b0}(t) = \frac{u_f(t)}{3R_f} - i_{p0}(t) \quad (14)$$

由图 8 可知，从 f 点向两侧归算，两侧等效零序系统可表示为

$$i_{b0}(t)R_{b0} + \frac{di_{b0}(t)}{dt}L_{b0} = i_{p0}(t)(R_{p0} + R_{f0}) + \frac{di_{p0}(t)}{dt}(L_{p0} + L_{f0}) \quad (15)$$

为了消除 $i_{b0}(t)$ ，可联立式(14)与式(15)，所得方程如(16)所示。

$$u_f(t)R_{b0} + \frac{du_f(t)}{dt}L_{b0} = i_{p0}(t)(R_{p0} + R_{f0} + R_{b0})3R_f + \frac{di_{p0}(t)}{dt}(L_{p0} + L_{f0} + L_{b0})3R_f \quad (16)$$

结合图 7、图 8 可知，由 f 点与 p 点之间构造的时域故障回路方程等效可表示为

$$u_f(t) = u_p(t) - (i_p(t) + K_R 3i_{p0}(t))R_{f2} - \frac{d(i_p(t) - K_L 3i_{p0}(t))}{dt}L_{f2} \quad (17)$$

结合以上两式，则 a 相接地故障对应的故障支路和补偿点之间的故障回路方程可进一步化为

$$u_{pa}(t) = x_1 \left[(i_{pa}(t) + K_R 3i_{p0}(t))r + \frac{d(i_{pa}(t) + K_L 3i_{p0}(t))}{dt}l \right] + x_2 \left[\frac{d(i_{pa}(t) + K_R 3i_{p0}(t))}{dt}r + \frac{d^2(i_{pa}(t) + K_L 3i_{p0}(t))}{dt^2}l \right] + x_3 i_{p0}(t) + x_4 \frac{di_{p0}(t)}{dt} + x_5 \frac{du_{pa}(t)}{dt} \quad (18)$$

式中： K_R 和 K_L 分别为线路电阻和电感参数的补偿常数； i_{pa} 和 u_{pa} 表示 p 点处的 a 相电气量。

结合图 8，式(17)中的 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 分别表示为

$$\begin{cases} x_1 = d_1 \\ x_2 = -\frac{d_1 L_{b0}}{R_{b0}} \\ x_3 = \frac{3R_f(R_{p0} + R_{f0} + R_{b0})}{R_{b0}} \\ x_4 = \frac{3R_f(L_{p0} + L_{f0} + L_{b0})}{R_{b0}} \\ x_5 = -\frac{L_{b0}}{R_{b0}} \end{cases} \quad (19)$$

式中， d_1 为补偿点到故障支路的等效距离。原故障回路的 4 个未知量如式(20)所示。

$$\begin{cases} d_1 = x_1 \\ R_{b0} = \frac{x_3(L_{p0} + L_{r0}) - x_4(R_{p0} + R_{r0})}{x_4 + x_3x_5} \\ L_{b0} = -x_5R_{b0} \\ R_f = \frac{x_3R_{b0}}{6(R_{p0} + R_{r0} + R_{b0})} + \frac{x_4R_{b0}}{6(L_{p0} + L_{r0} + L_{b0})} \end{cases} \quad (20)$$

由上述分析可知, 通过式(19)、式(20)的等效变换, 原本含有 4 个未知量的非线性方程转化为含有 5 个未知量的线性方程式(18), 这为方程的快速求解奠定了基础, 具体的求解方法将在本文 3.2 节呈现。

相间故障的等效正序分量网络如图 9 所示。

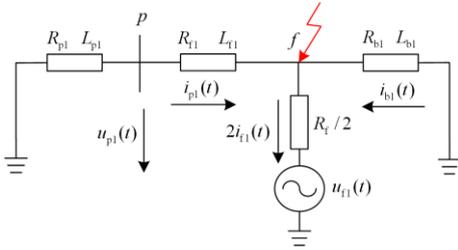


图 9 正序分量网络等效图

Fig. 9 Equivalent diagram of positive-sequence

component network

图 9 相关参数与图 8 类似, 在此不再赘述, 需要说明的是图中各参数下标“1”代表正序分量。

与单相接地故障的补偿点与故障支路之间的故障回路方程求解过程类似, ab 相相间故障回路电路可进一步表示为

$$\begin{aligned} u_{pab}(t) = & x_1 \left[i_{pab}(t)r + \frac{di_{pab}(t)}{dt}l \right] + x_2 \left[\frac{di_{pab}(t)}{dt}r + \right. \\ & \left. \frac{d^2i_{pab}(t)}{dt^2}l \right] + x_3 i_{pab}(t) + x_4 \frac{di_{pab}(t)}{dt} + \\ & x_5 \frac{du_{pab}(t)}{dt} \end{aligned} \quad (21)$$

式中, i_{pab} 和 u_{pab} 表示补偿点处的 ab 相电气量。原故障回路方程的 4 个未知量和式(21)中 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 的映射关系可表示为

$$\begin{cases} d_1 = x_1 \\ R_{b1} = \frac{x_3(L_{p1} + L_{r1}) - x_4(R_{p1} + R_{r1})}{x_4 + x_3x_5} \\ L_{b1} = -x_5R_{b1} \\ R_f = \frac{2x_3R_{b1}}{6(R_{p1} + R_{r1} + R_{b1})} + \frac{2x_4R_{b1}}{6(L_{p1} + L_{r1} + L_{b1})} \end{cases} \quad (22)$$

相间接地故障与上述两式中的分析过程类似, 在此不再展开。

3 保护算法的实现

3.1 故障判别方法

当风电并网系统距离 I 段区外发生故障时, 其区外故障对应的沿线电压幅值计算情况如图 10 所示。

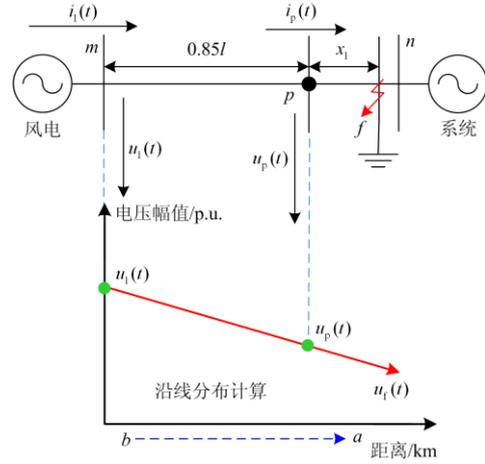


图 10 区外故障等效图

Fig.10 External fault equivalent diagram

针对区外故障, 考虑到 m 点至补偿点 p 处不存在故障支路, 因此两端点之间严格满足电气量的沿线分布规律^[17-18], 由 m 点归算至补偿点 p 点的电压相位不会发生突变。由于故障点的电压幅值相较于补偿点的电压较低, 由补偿点计算至故障点的过程中, 满足沿线电压分布规律。而式(18)或式(21)的本质是求解补偿点距故障点压降方向对应的等效距离^[17], 此时由于电压压降方向仍然由补偿点指向故障点, 因此由补偿点计算至故障点(电压最低点)的等效距离即为补偿点至故障点的压降对应的故障等效距离, 故计算得到的由补偿点至故障支路的等效距离 x_1 大于 0。将 x_1 和补偿点对应的距离 L_1 进行求和, 其结果在原理上大于 I 段区内动作整定值, 保护能有效减少暂态超越的风险。

对于区内故障, 此时由 m 点计算得到的电压幅值的沿线电压分布如图 11 所示。

图 11 可知, 当发生区内故障时, 由于近端 m 至补偿点处存在故障支路, 两点之间的沿线电压分布规律将在故障支路附近被破坏。此时在故障支路之后的沿线电压计算值方向将与近端 m 处的电压方向相反。由图 6 可知, 虽然故障点仍然是电压幅值最低点, 但是由于故障点之后的补偿点电压与故障点之前的电压方向相反, 因此补偿点处的计算电压方向为负。此时计算得到的压降方向为故障点指向补偿点, 进一步根据式(18)或式(21)求解补偿点距故障

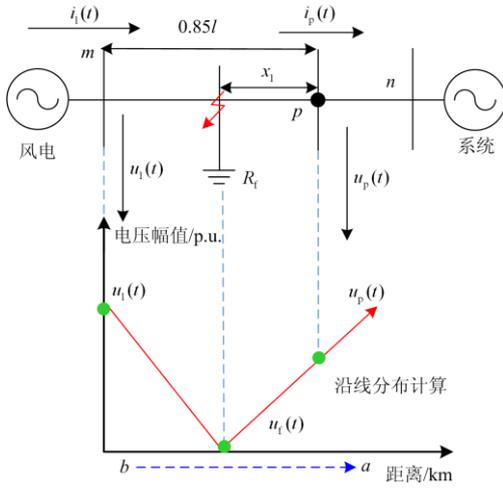


图 11 区内故障等效图

Fig. 11 Internal fault equivalent diagram

点压降方向对应的等效距离即为补偿点至故障点的压降的相反值对应的故障等效距离，故计算得到的由补偿点至故障支路的等效距离 x_1 小于 0。通过和 L_1 进行求和，其结果在原理上小于 I 段保护动作整定值。当区内发生非金属性接地故障时，文献[19]指出对于送端而言，计算得到的电压分布最小值出现在故障点附近，此时电压仍满足上述金属性故障对应的相位突变规律，由此计算出的 x_1 小于 0。故通过和 L_1 进行求和，其结果在原理上小于 I 段保护动作整定值，保护能够正确动作。

$$\begin{cases}
 \mathbf{Y} = \mathbf{X}\mathbf{A} \\
 \mathbf{Y} = [u_{\text{pab}}(1) \ u_{\text{pab}}(2) \ \cdots \ u_{\text{pab}}(N)]^T \\
 \mathbf{X} = \begin{bmatrix}
 i_{\text{pab}}(1)r + \frac{di_{\text{pab}}(1)}{dt}l & \frac{di_{\text{pab}}(1)}{dt}r + \frac{d^2i_{\text{pab}}(1)}{dt^2}l & i_{\text{pab}}(1) & \frac{di_{\text{pab}}(1)}{dt} & \frac{du_{\text{pab}}(1)}{dt} \\
 i_{\text{pab}}(2)r + \frac{di_{\text{pab}}(2)}{dt}l & \frac{di_{\text{pab}}(2)}{dt}r + \frac{d^2i_{\text{pab}}(2)}{dt^2}l & i_{\text{pab}}(2) & \frac{di_{\text{pab}}(2)}{dt} & \frac{du_{\text{pab}}(2)}{dt} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 i_{\text{pab}}(n)r + \frac{di_{\text{pab}}(n)}{dt}l & \frac{di_{\text{pab}}(n)}{dt}r + \frac{d^2i_{\text{pab}}(n)}{dt^2}l & i_{\text{pab}}(n) & \frac{di_{\text{pab}}(n)}{dt} & \frac{du_{\text{pab}}(n)}{dt}
 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{A} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T
 \end{cases} \quad (25)$$

式中， n 为最小二乘法利用的数据窗对应的采样点总数，数据窗长度选择 10 ms。

则最小二乘法中未知数矩阵的求解方法如式(26)所示。

$$\mathbf{A} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (26)$$

通过式(26)，并进行滑窗处理运算，计算得到由补偿点计算至故障支路的等效距离为 x_1 ，与补偿

3.2 算法实现流程

1) 电气量信息的滤波处理。考虑时域长线参数效应的沿线电气量计算公式(式(11)、式(12))具有一定的适用频带^[20-21]，一般小于 300 Hz。另外，考虑沿线电压分布计算时的线性化特征^[22-23]，根据线性电压分布拟合误差可近似计算截止频率，其表达式如式(23)所示。

$$E_m = 1 - \cos(\omega l / 2v) \quad (23)$$

式中， ω 为滤波器的截止频率。

根据式(23)可知，当交流线路长度达到 300 km 时，为保障拟合误差的总体小于 5%，因此建议截止频率选择 80 Hz 以下，综上文选择截止频率为 80 Hz 的四阶巴特沃斯低通滤波器。

2) 相模变换。选择 20 ms 数据长度，将近端系统 m 点处电气量利用 Karebauer 相模变换转变为模量信息，其变换过程如式(24)所示。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (24)$$

3) 沿线分布电压、电流计算。选择 20 ms 总数据长度，将利用 Karebauer 相模变换转变为模量信息，代入式(11)和式(12)中求解补偿点处的电气量信息。经过逆变换，得到补偿点处故障相的电气量。

4) 计算故障距离。参考故障选相结果，利用最小二乘法，求解式(18)或式(21)中的未知数。以式(21)举例进行说明，则式(21)的方程组形式如式(25)所示。

点设定距离 L_1 进行求和，得到由近端 m 至故障支路的等效距离 d ，最后求解得到动作阻抗 Z_{dz} 。

5) 保护动作判据。若动作阻抗落在由 Z_{set} 构成的方向圆阻抗继电器内，识别为 I 段保护区域内故障；反之判别为保护区域外故障。距离保护的 I 段保护范围一般选择 0.85 倍的全长线路，因此上述判别过程保护的行动条件可表示为

$$|Z_{dz} - 0.5Z_{set}| \leq |0.5Z_{set}| \quad (27)$$

4 保护原理验证

以某地区规模化双馈风力发电系统为例, 其等效网架拓扑如图 12 所示。其中风力发电机组的相关参数、控制策略、线路等效参数参考文献[15, 17], 利用 PSCAD 构建风电接入系统模型, 在 Matlab 中实现原理功能。为验证原理在长距离线路的算法性能, 文中以 250 km 为例, 数据采样率为 4 kHz。选择的运算的数据窗长度为 10 ms, 总数据窗长度为 20 ms。为提高算法的抗干扰能力和运算精度, 采用滑窗运算处理[24-25]。

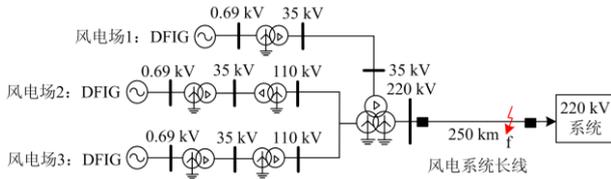


图 12 双馈风电接入系统图

Fig. 12 DFIG power connected to grid diagram

4.1 不同故障距离下保护原理的性能验证

为验证保护算法在风电系统长线的保护适用性, 用算法仿真结果与文献[11, 15]对比分析。距离保护暂态超越现象规定: 距离 I 段保护须在 I 段全长的 0.95 以内正确识别故障; 而在 I 段的 1.05 以外不动作。因此区内故障和区外故障分别选择 I 段全长的 0.95(202 km)和 1.05(223 km)。故障类型选择 a 相经 150 Ω 接地故障。距离 I 段保护仿真结果如图 13—图 18 所示, 并将仿真结果汇总至表 1。保护动作情况说明: 将计算得到的 d 对应故障回路计算阻抗结合 I 段阻抗圆继电器, 当计算阻抗完全落在圆内时判别为距离 I 段区内故障; 当计算阻抗完全落在圆外时, 判别为 I 段区外故障。距离 I 段继电器类型选择方向圆阻抗继电器。

结合表 1 的仿真结果可知, 对于文献[11]和文献[15]中的保护原理能够在距离 I 段区内发生故障时正确动作, 但测量距离受分布参数效应和过渡

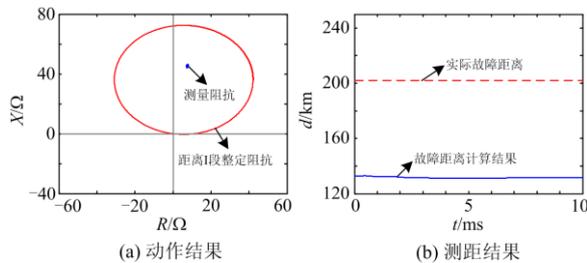


图 13 文献[11]提出的方法(区内故障)

Fig. 13 Method proposed by [11] (internal fault)

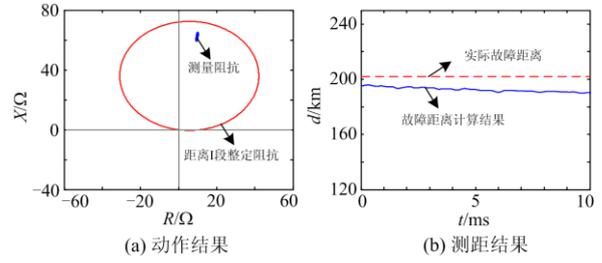


图 14 文献[15]提出的方法(区内故障)

Fig. 14 Method proposed by [15] (internal fault)

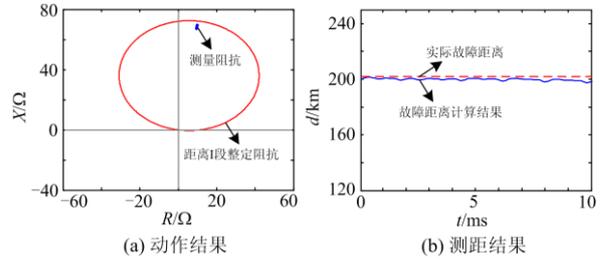


图 15 本文提出的方法(区内故障)

Fig. 15 Proposed method of this paper (internal fault)

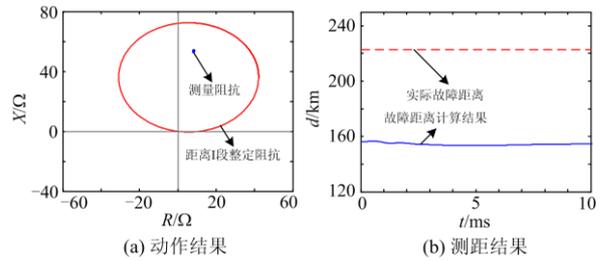


图 16 文献[11]提出的方法(区外故障)

Fig. 16 Method proposed by [11] (external fault)

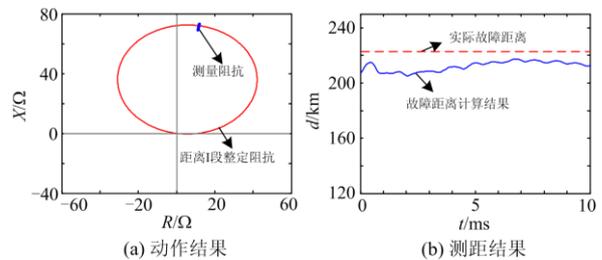


图 17 文献[15]提出的方法(区外故障)

Fig. 17 Method proposed by [15] (external fault)

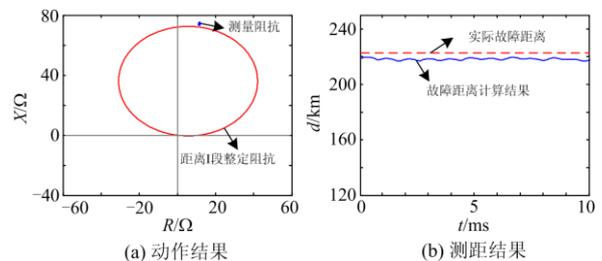


图 18 本文提出的方法(区外故障)

Fig. 18 Proposed method of this paper (external fault)

表 1 仿真结果汇总

Table 1 Simulation results summary

方法	动作结果 (202 km)	动作结果 (223 km)	计算距离 (202 km)	计算结果 (223 km)
文献[11]	正确动作	区外误动	132.45 km	156.88 km
文献[15]	正确动作	区外误动	192.37 km	210.25 km
本文方法	正确动作	不动作	199.76 km	217.34 km

电阻影响, 较真实距离偏小。对于保护区外故障时, 由于分布参数效应, 易发生暂态超越现象。文中提出的原理由于将补偿点设置在距离 I 段末端, 且考虑了对端系统对于故障支路的助增效应, 因此减少了保护区外故障时的误动风险。

4.2 高过渡电阻下保护原理的性能验证

为验证原理在高过渡电阻的保护适应性, 将原理与文献[17]进行仿真性能对比。故障发生位置的选择同 4.1 节, 过渡电阻选择 a 相经过 300 Ω 过渡电阻接地故障。在高过渡电阻影响下的保护性能仿真如图 19—图 22 所示, 保护动作结果如表 2 所示。

结合表 2 的仿真结果可知, 对于文献[17]保护原理, 虽然进行了分布参数补偿策略, 但将故障支路设置在中点, 在被保护区域内故障时造成测量阻抗较小, 但仍能保证 I 段保护准确识别故障。但对于被保护区外时, 未考虑对端系统对于故障支路

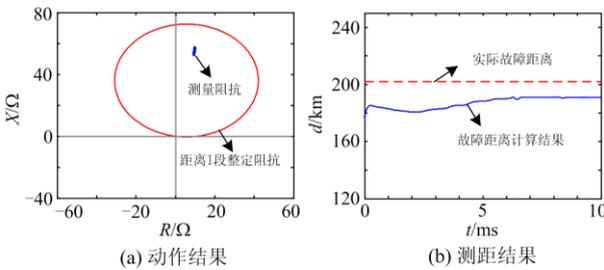


图 19 文献[17]提出的方法(区内高阻故障)
Fig. 19 Method proposed by [17] (internal fault with high fault impedance)

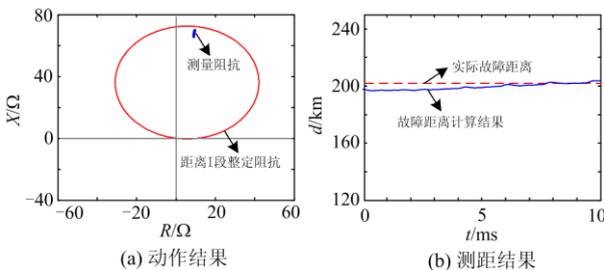


图 20 本文提出的方法(区内高阻故障)
Fig. 20 Proposed method of this paper (internal fault with high fault impedance)

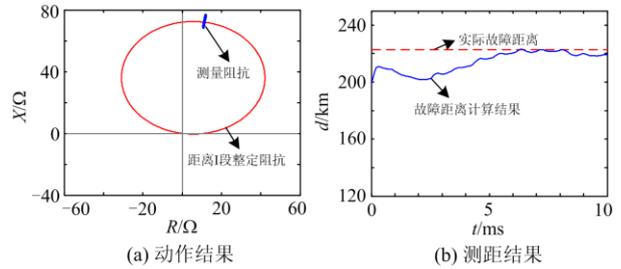


图 21 文献[17]提出的方法(区外高阻故障)
Fig. 21 Method proposed by [17] (external fault with high fault impedance)

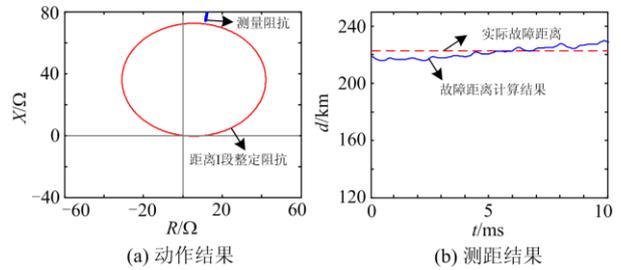


图 22 本文提出的方法(区外高阻故障)
Fig. 22 Proposed method of this paper (external fault with high fault impedance)

表 2 高过渡电阻下的保护动作结果

Table 2 Protection action result under higher fault impedance

方法	动作结果 (202 km)	动作结果 (223 km)	计算距离 (202 km)	计算结果 (223 km)
文献[17]	正确动作	区外误动	186.45 km	212.99 km
本文方法	正确动作	不动作	199.87 km	221.38 km

的助增影响, 受被保护区外高阻故障带来的稳态超越现象影响, 保护性能下降。文中提出的保护原理在引入分布参数模型的基础上, 计及对端系统对于故障支路的影响, 保证保护原理在区内外发生故障时, 均能够正确动作。

4.3 抗干扰性能验证

为验证保护算法在噪声干扰和不同采样率的性能, 选取 30 dB 白噪声, 数据的采样率选择 2 kHz、4 kHz、6 kHz、10 kHz。选择 ab 相相间故障为例。故障发生的位置选择同 4.1 节。仿真结果如表 3 所示。

由表 3 可知, 文中提出的保护原理由于基于参数识别思想, 仅反应故障支路与近端 m 处的故障参数关系, 无需利用电气量波形进行判别, 因此受采样率影响较小。另外保护算法在计算故障距离的过程中, 采用滑窗方法处理数据, 因此对于故障异常数据点的鲁棒性较强。原理计及了长线分布参数效应, 区内末端故障时仍能保证故障的判别。

表 3 保护性能验证结果

Table 3 Protection performance verification results

采样率/ kHz	动作结果 (202 km)	动作结果 (223 km)	计算距离 (202 km)	计算结果 (223 km)
2 kHz	正确动作	不动作	198.65 km	221.45 km
4 kHz	正确动作	不动作	198.79 km	221.14 km
6 kHz	正确动作	不动作	199.06 km	220.89 km
10 kHz	正确动作	不动作	200.37 km	222.68 km

5 结论

对比现有风电系统时域距离保护原理, 通过保护性能分析与仿真验证, 结论如下:

1) 文中提出的保护原理引入分布参数模型, 将补偿点设置在距离 I 段末端, 在较大程度上克服长线距离 I 段末端发生暂态超越的影响。

2) 结合分布参数模型与参数识别思想, 将补偿点之后列写包含对端系统的时域参数识别距离方程, 方程中计及远端系统对故障支路的助增影响。原理上减少了原有面向风电系统的时域距离保护将对端系统进行假设影响, 通过计及对端系统参数, 进一步减少了过渡电阻的影响。

3) 保护原理同时考虑了分布参数影响和过渡电阻影响, 保证了风电系统长线末端发生故障时, 保护能够正确动作, 且原理受采样率和噪声干扰影响较小。

参考文献

- [1] YAN C, TANG Y, DAI J, et al. Uncertainty modeling of wind power frequency regulation potential considering distributed characteristics of forecast errors[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(3): 276-288.
- [2] XU Kehan, ZHANG Zhe, LAI Qinghua, et al. Study on fault characteristics and distance protection applicability of VSC-HVDC connected offshore wind power plants[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 133.
- [3] ZOLFAGHARI M, CHABANLO R M, ABEDI M, et al. A robust distance protection approach for bulk AC power system considering the effects of HVDC interfaced offshore wind units[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(4): 3786-3795.
- [4] 王春又, 孙士云, 毛肖, 等. 适用于双馈风电场送出线的时域距离纵联方向保护[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 82-94.
WANG Chunyou, SUN Shiyun, MAO Xiao, et al. Longitudinal direction protection of time domain distance applicable to the outgoing line of a double-fed wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 82-94.
- [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] 陈洁羽, 谈震, 贺晓, 等. 传统选相元件在风电集中接入系统中的应用研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(5): 27-32.
CHEN Jieyu, TAN Zhen, HE Xiao, et al. Application of traditional phase selector in wind power centralized access system[J]. Smart Power, 2018, 46(5): 27-32.
- [7] 龚永智, 陶晔, 许传敏, 等. 考虑风电机组馈入电流的风电场汇集线路保护整定计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 128-135.
GONG Yongzhi, TAO Ye, XU Chuanmin, et al. Relay protection setting calculation of wind farm collector lines considering wind turbine increased short-circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 128-135.
- [8] 陈玉. 基于输电线路暂态分量的快速距离保护原理及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [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. Adaptability analysis of distance protection in power system integration with wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 10-15.
- [10] HAN J, ZHENG L, JIA K, et al. Protection adaptability analysis in VSC-HVDC-connected offshore wind farm system[C] // 8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019), 2019, Shanghai, China: 1-5.
- [11] 罗瑞, 樊艳芳, 刘群杰. 基于时域的交流直流混联系统抗过渡电阻的单相接地距离保护研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(12): 123-129.
LUO Rui, FAN Yanfang, LIU Qunjie. Research on anti-transition resistance single-phase ground distance protection of AC-DC hybrid power system based on time-domain[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(12): 123-129.
- [12] 杨增力, 孔祥平, 王力军, 等. 适用于双馈风电场联络线的距离保护方案[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 252-260.

YANG Zengli, KONG Xiangping, WANG Lijun, et al. Distance protection scheme for interconnection line of doubly-fed induction generator based wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 252-260.

[13] 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.

[14] 范小红, 孙士云, 王春又, 等. 适应于双馈风电场送出线不对称故障的时域距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 82-91.

FAN Xiaohong, SUN Shiyun, WANG Chunyou, et al. Time domain distance protection for asymmetric faults of an outgoing line in doubly-fed wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 82-91.

[15] 侯俊杰, 樊艳芳, 王一波. 适应于集群风电送出线的参数识别时域距离保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 46-53.

HOU Junjie, FAN Yanfang, WANG Yibo. Research on time domain distance protection of parameter identification for cluster wind power transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 46-53.

[16] 贾科, 杨哲, 赵其娟, 等. 适用于新能源场站送出线路的高频突变量距离保护[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3271-3280.

JIA Ke, YANG Zhe, ZHAO Qijuan, et al. High-frequency fault component based distance protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3271-3280.

[17] 侯俊杰, 樊艳芳. 基于分布参数模型的风电系统长距离送出线时域距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 26-33.

HOU Junjie, FAN Yanfang. Time domain distance protection for long distance outgoing line of wind power system based on distributed parameter model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 26-33.

[18] SONG G, CHU X, GAO S, et al. Novel distance protection based on distributed parameter model for long-distance transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2126-2123.

[19] SUONAN J, ZHANG J, JIAO Z, et al. Distance protection for HVDC transmission lines considering frequency-dependent parameters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 723-732.

[20] 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. Protection of high voltage AC transmission lines based on equal transfer process[J]. Smart Power, 2019, 47(12): 22-29.

[21] 宋国兵, 饶菁, 高淑萍, 等. 基于补偿电压的高压直流输电线路单端电气量保护[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 102-106.

SONG Guobing, RAO Jing, GAO Shuping, et al. Monopole protection for HVDC transmission lines based on compensating voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 102-106.

[22] QIN Y, WEN M, ZHENG J, et al. A novel distance protection scheme for HVDC lines based on R-L model[J]. International Journal of Electric Power Energy Systems, 2018, 100(1): 167-177.

[23] 高小全, 刘宏君, 俞伟国, 等. 一种应用于线路保护装置嵌入式行波测距方法[J]. 浙江电力, 2020, 39(3): 1-7.

GAO Xiaoquan, LIU Hongjun, YU Weiguo, et al. A method of embedded traveling wave fault location for line protection device[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(3): 1-7.

[24] 成剑, 罗安, 付青. 简化 DFT 滑窗迭代算法在有源电力滤波器谐波检测中应用[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(5): 57-60.

CHENG Jian, LUO An, FU Qing. Simplified DFT sliding window iterative algorithm for active power filter harmonic detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(5): 57-60.

[25] CHEN Yu, WEN Minghao, YIN Xianggen, et al. Distance protection for transmission lines of DFIG-based wind power integration system[J]. International Journal of Electric Power Energy Systems, 2018, 100: 438-448.

收稿日期: 2021-06-14; 修回日期: 2021-10-12

作者简介:

侯俊杰(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 826686025@qq.com

宋国兵(1972—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: song.gb@mail.xjtu.edu.cn

(编辑 张爱琴)