

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.256125

新能源并网线路阻抗补偿时域距离保护方法

王朝明, 孙志攀, 洪丰, 吴通华, 戴魏, 江源

(国网电力科学研究院有限公司(南瑞集团有限公司), 江苏 南京 211106)

摘要: 新能源并网线路发生接地故障时, 新能源电源故障电流弱馈及强受控特性将导致距离保护性能下降。针对新能源并网线路经过渡电阻接地故障常用工频量距离保护灵敏度不足, 常规时域距离保护可靠性低的问题, 提出一种适应单相接地故障的基于阻抗补偿原理的时域距离保护方法。首先, 通过构建时域等式实时求解故障点等效过渡电阻阻值。然后, 建立附加阻抗与等效过渡电阻联系, 并据此得到精确的阻抗补偿模型, 形成阻抗补偿时域距离保护判据。最后, 基于 PSCAD/EMTDC 仿真实验, 验证了所提方案在保证可靠性的前提下, 显著提升了距离保护经过渡电阻故障时的灵敏度, 可以较好地适用于新能源经交流线路送出的场景。

关键词: 距离保护; 新能源并网; 适应性分析; 过渡电阻; 阻抗补偿

Time-domain distance protection method for new energy-integrated lines based on impedance compensation

WANG Zhaoming, SUN Zhipan, HONG Feng, WU Tonghua, DAI Wei, JIANG Yuan

(State Grid Electric Power Research Institute (NARI Group Corporation), Nanjing 211106, China)

Abstract: When ground faults occur on new energy-integrated lines, the weak fault current injection and strong controllability of new energy sources can degrade distance protection performance. To address the insufficient sensitivity of conventional power-frequency distance protection during ground faults with transition resistance on new energy-integrated lines and the low reliability of conventional time-domain distance protection, this paper proposes a time-domain distance protection method based on impedance compensation for single-phase-to-ground faults. First, the equivalent transition resistance at the fault point is solved in real time by establishing time-domain equations. Then, the relationship between the additional impedance and the equivalent transition resistance is established to derive an accurate impedance compensation model, forming the impedance-compensated time-domain distance protection criterion. Finally, PSCAD/EMTDC simulations verify that the proposed scheme significantly enhances the sensitivity of distance protection during transition resistance faults while ensuring reliability, demonstrating practical applicability for new energy integration via AC lines.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2401000).

Key words: distance protection; new energy integration; adaptability analysis; transition resistance; impedance compensation

0 引言

与电流保护和电压保护相比, 距离保护的保护范围与灵敏度受系统运行方式变化的影响较小, 能在复杂网络中快速、有选择性地切除故障, 在高压输电电路上获得了广泛应用, 是输电线路中最重要的后备保护^[1-3]。

单相接地故障是输电线路运行中最常见的故障类型, 且通常伴随有过渡电阻。对于送出线路, 其现有保护策略以纵联保护、距离保护为主^[4], 因此距离保护是最主要的后备保护。然而, 随着电力系统向着高比例可再生能源和高比例电力电子设备趋势快速发展, 经过渡电阻接地故障时现有距离保护灵敏性变差, 如何提升距离保护动作性能成为亟待研究的问题。

针对新能源输电线路接地距离保护适应性分析

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2401000)

及改进,国内外学者近年来进行了深入研究,文献[5-6]提出风电接入具有弱馈特性,而撬棒的投入会进一步增强双馈风机的弱馈特性,进而导致场站侧过渡电阻的影响被放大,造成场站侧距离保护拒动。文献[7-12]从新能源系统频偏、谐波等特性分析了距离保护的适用性,并提出了时域距离保护改进方法、基于相角差余弦值等新方法,然而时域距离方法并未阐述故障两侧零序电流相角差对时域距离保护影响,相角差余弦值方法计算复杂难以实现。文献[13-14]分析了相间距离保护的适用性,但并未对新能源系统中接地距离保护适用性进行详细论证。文献[15]通过改进VSG控制策略针对性提升距离保护适用性,其应用场景有一定局限性。文献[16-17]针对海上风电系统距离保护不适用性,提出利用场站侧负序电流替代故障点电流的距离保护新原理。此方案适用于采用负序抑制控制策略的场站,有一定局限性。文献[18]提出一种改进时域距离保护方法,但此方案需求解未知数较多,在故障稳态时方程组的可解性有待验证。此外还有基于时域距离保护和控保协同的方法可克服过渡电阻、频偏等因素对距离保护的影响^[19-21],但基于阻抗假设的方法受线路模型的影响,基于控保协同的方法所要求的控制策略较为复杂,在工程应用上仍存在改进空间。

为解决新能源系统弱馈特征导致的经过渡电阻接地影响距离保护性能的问题,本文首先全面分析了新能源接入系统的故障特征及常用单相接地距离保护方法的适应性,并对两侧零序电流存在角差时接地时域距离保护动作机理进行分析,在此基础上提出了一种基于阻抗补偿的时域距离保护方法,最终通过PSCAD/EMTDC搭建新能源接入系统模型,验证了所提方案的有效性。

1 新能源接入系统故障特征

典型新能源接入系统的拓扑结构如图1所示。其中,新能源主要由发电单元、逆变器和出口滤波器构成。电能经升压变升压后,通过输电线路汇入系统。在高压输电系统中,新能源侧变压器中性点接地,因此输电线路发生接地故障时存在零序电流通路。

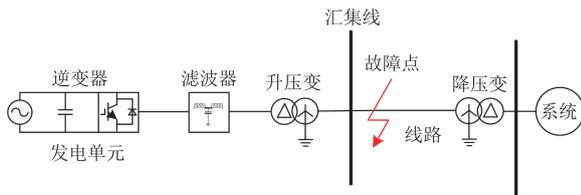


图1 典型新能源接入系统的拓扑结构图

Fig. 1 Topology of a typical new energy access into system

当新能源接入系统发生不对称故障时,为维持直流侧电容电压稳定和功率因数运行,并满足并网电流的对称要求,一般采用负序电流抑制的正负序解耦低压穿越策略^[22],控制框图如图2所示。

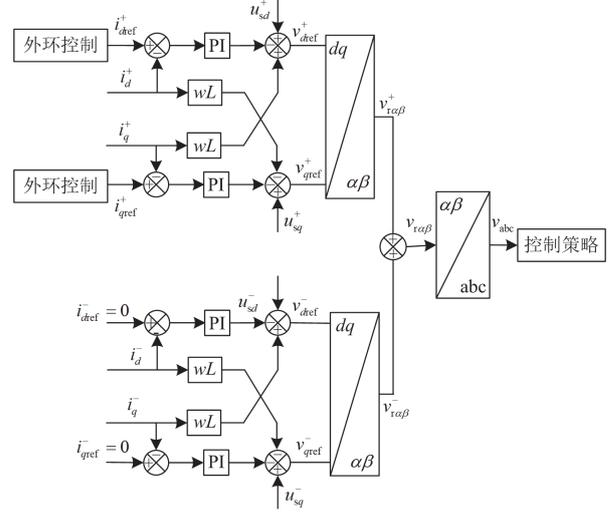


图2 低压穿越策略控制框图

Fig. 2 Control block diagram of low-voltage ride-through strategy

图2中: i_d^+ 、 i_q^+ 、 i_d^- 、 i_q^- 分别为正、负序有功、无功电流测量值; i_{dref}^+ 、 i_{qref}^+ 和 i_{dref}^- 、 i_{qref}^- 分别为 d 、 q 轴正、负序有功电流参考值和正、负序无功电流参考值; L 为等效电感; w 为角速度; u_{sd}^+ 、 u_{sq}^+ 、 u_{sd}^- 、 u_{sq}^- 分别为 d 、 q 轴正、负序电压测量值; v_{dref}^+ 、 v_{qref}^+ 、 v_{dref}^- 、 v_{qref}^- 分别为 d 、 q 轴正、负序电压参考值; $v_{r\alpha\beta}^+$ 、 $v_{r\alpha\beta}^-$ 分别为派克变换后的正、负序电压参考值; v_{abc} 为克拉克变换后得到的交流调制电压。

并网点电压与正序 d 、 q 轴电流关系可表示为^[23]

$$\begin{cases} i_d^+ = \min\left(\frac{P}{U_+}, \sqrt{i_{max}^2 - i_{qref}^2}\right) \\ i_q^+ = \begin{cases} 0 & U_+ > 0.9 \text{ p.u.} \\ -K_1(0.9 - U_+)I_N & 0.2 \text{ p.u.} \leq U_+ \leq 0.9 \text{ p.u.} \\ \text{脱网} & U_+ < 0.2 \text{ p.u.} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 为输入有功; U_+ 为换流器端口正序电压幅值; i_{max} 为换流器允许流过的最大电流; i_{qref} 为 q 轴电流参考值; I_N 为风电场额定电流; K_1 为风电场动态无功电流比例系数。受穿越控制与负序电流抑制的影响,故障暂态期间送出线路保护安装处的三相电压、电流信号中的正、负序分量的幅值、相位变化特征与常规同步电源不同,可能会干扰现有阻抗继电器的正确动作,需要详细研究。

2 单相接地距离保护适应性分析

图3为典型风电接入系统输电线路故障拓扑示意图。

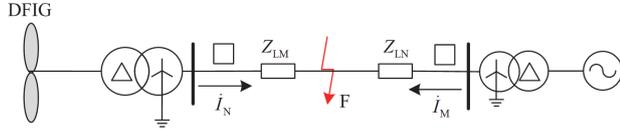


图3 风电接入系统故障拓扑示意图

Fig. 3 Fault topology schematic diagram of wind power integration system

图3中：风场经升压变电站接入大系统，在输电线路F点发生故障， Z_{LM} 、 Z_{LN} 分别为故障点两侧线路阻抗。以A相接地故障为例，复合序网为正、负序网络和零序网络的串联。如图4所示，新能源侧可表示为等效电压源串联等值内阻，考虑故障后负序抑制策略，新能源侧负序网络等效开路^[24]。

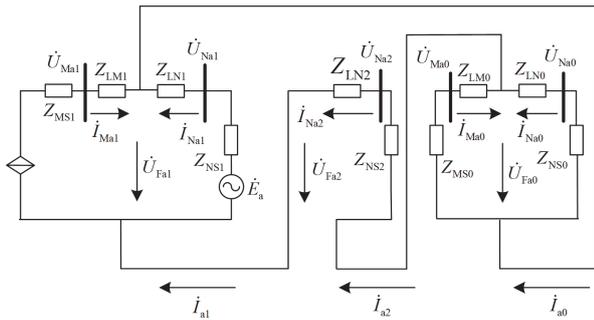


图4 单相接地复合序网示意图

Fig. 4 Schematic diagram of single-phase grounding composite sequence network

图4中： \dot{U}_{Ma1} 、 \dot{U}_{Ma0} 和 i_{Ma1} 、 i_{Ma0} 分别为M侧A相正序、零序电压和电流； \dot{U}_{Na1} 、 \dot{U}_{Na2} 、 \dot{U}_{Na0} 和 i_{Na1} 、 i_{Na2} 、 i_{Na0} 分别为N侧A相正、负、零序电压和电流； \dot{U}_{Fa1} 、 \dot{U}_{Fa2} 、 \dot{U}_{Fa0} 为故障点A相正、负、零序电压； i_{a1} 、 i_{a2} 、 i_{a0} 为故障点A相正、负、零序电流； Z_{LM1} 、 Z_{LM0} 分别为M侧线路正序、零序阻抗； Z_{LN1} 、 Z_{LN2} 、 Z_{LN0} 为N侧线路正、负、零序阻抗； Z_{MS1} 、 Z_{MS0} 分别为M侧场站正序、零序阻抗； Z_{NS1} 、 Z_{NS2} 、 Z_{NS0} 为N侧系统正、负、零序阻抗。

2.1 常规比相式距离继电器适应性分析

比相式距离继电器的动作方程一般为

$$90^\circ \leq \arg\left(\frac{\dot{U}_{op}}{\dot{U}_p}\right) \leq 270^\circ \quad (2)$$

式中： $\arg(\cdot)$ 为复数求相角函数； \dot{U}_{op} 为工作电压也称补偿电压； \dot{U}_p 为极化电压，一般取保护安装处正序电压。对于接地阻抗继电器，A相工作电压表示为

$$\dot{U}_{op} = \dot{U}_{Ma} - (i_{Ma} + K_Z 3i_0)Z_{set} \quad (3)$$

式中： \dot{U}_{Ma} 、 i_{Ma} 分别为M侧保护安装处的A相测量相电压、相电流； i_0 为保护安装处的测量零序电流； Z_{set} 为整定阻抗； K_Z 为零序补偿系数。

常规比相式距离继电器的工作原理为：当区内故障时，工作电压与极化电压相位相反；当区外故障时，工作电压与极化电压相位相同。

2.1.1 金属性单相接地故障

当新能源接入系统线路发生金属性单相接地故障时，由于零序网络不变，零序电流起钳制作用，场站侧和系统侧保护安装处的测量电压和正序电压基本同相位，比相式距离保护性能不受影响，推导过程详见附录A。

2.1.2 单相经过渡电阻接地故障

新能源接入系统线路发生故障时，新能源可等效为理想电压源串联等值内阻，且单相接地故障前后两侧电压功角变化较小。但与常规交流系统相比，新能源在线路故障时，提供的短路电流远小于系统侧，相当于弱电源，等值内阻占比很大^[24]。

因此，常规交流系统和新能源接入系统在场站侧线路首端发生单相经小过渡电阻接地故障时，电压相量关系如图5所示。其中 \dot{E}_M 、 \dot{E}_N 分别为两侧电源等效电动势； \dot{U}_1 为保护安装处正序电压； \dot{U}_{F0} 为故障点故障前电压； \dot{U}_F 为故障点电压。由图5可知，在此工况下，新能源接入系统场站侧工作电压更容易进入非动作区，比相式距离继电器的抗过渡电阻能力明显低于常规交流系统。

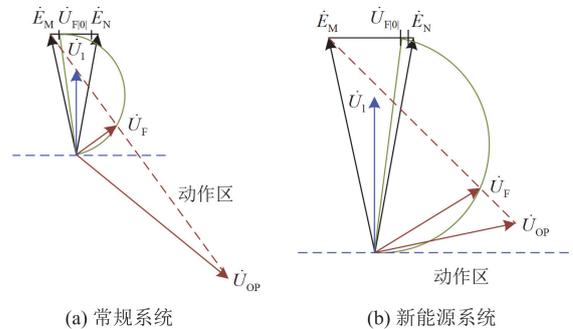


图5 送端出口单相故障送端电压相量图

Fig. 5 Phasor diagram of sending-end voltage during single-phase fault at sending terminal

同理，常规交流系统和新能源接入系统在系统侧线路末端发生单相经小过渡电阻接地故障时，电压相量关系如图 6 所示。在此工况下，系统侧工作电压更容易进入动作区，比相式距离继电器的抗过渡电阻能力明显高于常规交流系统。

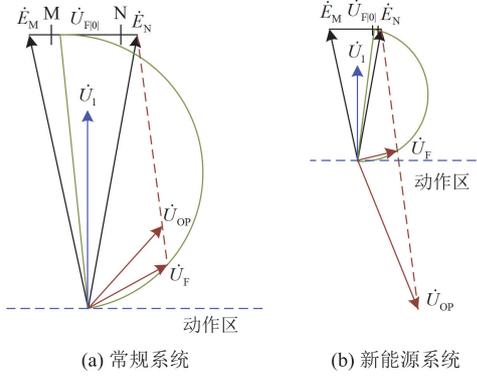


图 6 送端出口单相故障受端电压相量图

Fig. 6 Phasor diagram of receiving-end voltage during single-phase fault at sending terminal

2.2 常规测距式距离继电器适应性分析

接地距离保护测量阻抗的计算公式为

$$Z_m = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m + 3K_Z \dot{I}_{m0}} = Z_k + \frac{\dot{I}_F}{\dot{I}_m + 3K_Z \dot{I}_{m0}} R_F + Z_k + K_R R_F = Z_k + Z_{add} \quad (4)$$

式中： Z_m 为接地距离保护测量阻抗； \dot{U}_m 、 \dot{I}_m 分别为保护安装处故障相电压、电流的傅式计算值； \dot{I}_{m0} 为零序电流傅式计算值； \dot{I}_F 为故障点电流相量； Z_k 和 Z_{add} 分别为故障短路阻抗和过渡电阻附加阻抗； K_R 为附加阻抗系数； R_F 为过渡电阻值。

2.2.1 金属性单相接地故障

当 $R_F = 0 \Omega$ ，测量阻抗即短路阻抗，仅与保护安装处的测量电压和测量电流有关，新能源对测距式距离继电器动作性能无影响。

2.2.2 单相经过渡电阻接地故障

以 A 相接地为例，结合图 4， K_R 可进一步表示为

$$K_R = \frac{\dot{I}_{Ma1} + \dot{I}_{Ma2} + \dot{I}_{Ma0} + \dot{I}_{Na1} + \dot{I}_{Na2} + \dot{I}_{Na0}}{\dot{I}_{Ma1} + \dot{I}_{Ma2} + (1 + 3K_Z)\dot{I}_{Ma0}} \quad (5)$$

式中： \dot{I}_{Ma2} 为 M 侧 A 相负序电流。对于系统侧， K_R 幅值一般小于 1，系统侧附加阻抗 Z_{add} 小于实际过渡电阻 R_F ，对测距式距离继电器影响很小^[25]。场站侧由于正序电流限流及负序抑制策略，故障电流以零序电流为主，但本侧变压器阻抗大于对侧，零序分支系数较小；同时，系统侧电流与零序电流相位

基本一致，因此，场站侧的附加阻抗很大，且基本呈阻性，易导致测量阻抗落在测距式距离继电器动作区外，距离保护性能下降。

2.3 时域距离保护适应性分析

2.3.1 时域距离保护原理

对于新能源接入线路，现有时域保护大多基于输电线路的阻感模型，如图 7 所示。

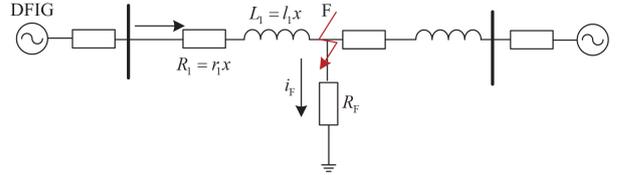


图 7 输电线路阻感模型

Fig. 7 Resistance-inductance model of transmission line

图 7 中： r_1 、 l_1 分别为单位长度线路的电阻以及电感； R_1 、 L_1 分别为故障段线路的等效电阻与电感； i_F 为故障点电流瞬时值； x 为故障距离。

若线路发生 A 相单相接地故障，保护安装处电压、电流存在式(6)所示关系。

$$u_{mA}(t) = R_1(i_{mA}(t) + 3K_r i_{m0}(t)) + L_1 \frac{d(i_{mA}(t) + 3K_l i_{m0}(t))}{dt} + i_F(t)R_F \quad (6)$$

式中： $u_{mA}(t)$ 、 $i_{mA}(t)$ 分别为 A 相电压、电流的瞬时值； $i_{m0}(t)$ 为零序电流瞬时值； K_r 为电阻零序补偿系数， $K_r = (r_0 - r_1)/(3r_1)$ ； K_l 为电感零序补偿系数， $K_l = (l_0 - l_1)/(3l_1)$ ，其中 r_0 、 l_0 分别为单位长度线路的零序电阻值及电感值。

对于单端保护，无法准确得知 $i_F(t)$ ，但在一定条件下，近似认为零序电流的相位与之相近，从而有 $i_F(t) = 3i_{m0}(t)/C_F$ ， C_F 为保护安装处的零序分配系数，因此式(6)可改写为

$$u_{mA}(t) = R_1(i_{mA}(t) + 3K_r i_{m0}(t)) + L_1 \frac{d(i_{mA}(t) + 3K_l i_{m0}(t))}{dt} + 3i_{m0}(t)R'_F \quad (7)$$

式中： R'_F 为等效过渡电阻。若将线路单位长度的阻抗视为定值，可将式(7)进一步改写为

$$u_{mA}(t) = [r_1(i_{mA}(t) + 3K_r i_{m0}(t)) + l_1 \frac{d(i_{mA}(t) + 3K_l i_{m0}(t))}{dt}]x + 3i_{m0}(t)R'_F \quad (8)$$

对于离散采样数据，采用中值差分代替微分的方法，基于线路阻感模型的方程可表示为

$$u_{mA}(k) = [r_1(i_{mA}(k) + 3K_r i_{m0}(k)) + l_1(i_{mA}(k+1) + 3K_r i_{m0}(k+1) - i_{mA}(k-1) - 3K_l i_{m0}(k-1)(2\Delta t))]x + 3i_{m0}(k)R'_F \quad (9)$$

式中: k 为采样点编号; Δt 为采样间隔。利用保护装置采集的电压、电流采样点信息, 可以得到一系列方程, 整理为矩阵形式, 如式(10)所示。

$$U = I\beta \quad (10)$$

式中: U 、 I 和 β 分别为电压信息、电流信息及待求系数矩阵。

采用最小二乘法即可求解故障位置 x 及等效过渡电阻 R'_F 。通过比较 x 是否在设定的保护范围内即可确定保护是否动作, 该方案理论上不受频偏、谐波、过渡电阻影响。

2.3.2 时域距离保护在接地故障中存在的问题

现有时域距离保护近似认为保护安装处零序电流与故障点电流相位相同, 在此假设条件下, 测距结果准确度很高。然而, 由于变压器的存在, 线路零序阻抗角与系统零序阻抗角大多不一致, 进而导致保护安装处零序电流与故障点电流相位不一致, 此时时域距离保护测距结果存在误差。为便于理解, 采用频域方法对测距误差产生机理进行分析。

参考式(4), 当线路经过渡电阻单相接地故障时, 可以建立如式(11)所示等式。

$$\dot{U}_m = (\dot{I}_m + 3K_Z \dot{I}_{m0}) z_1 x + \dot{U}_F \quad (11)$$

式中: z_1 为线路单位长度阻抗定值。采用保护安装处零序电流代替故障点电流方法, 可能使用错误计算电压相位求解符合式(11)的故障测距解, 可能会代入错误故障电压相位求解故障测距, 导致计算结果存在误差。以保护安装处零序电流相位超前为例, 具体关系如图 8 所示, x' 为使用超前的零序电流替代故障电流解得的故障测距, \dot{U}'_F 表示零序电流超前时等效故障电压相位。

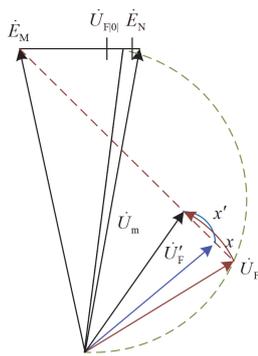


图 8 零序电流相位超前电压示意图

Fig. 8 Schematic diagram of zero-sequence current leading voltage phase

如图 8 所示, 当故障点零序电流相位超前时, 解得故障测距显然偏小, 保护可能误动, 反之当零序电流相位滞后时, 解得故障位置偏大, 保护可能

拒动。对于高压线路, 一般配置差动保护作为主保护, 因此对距离保护的可靠性要求高于灵敏性, 在这样的背景下常规时域距离保护区内的误动问题导致其无法直接应用于实际工程。

综上所述, 新能源接入系统交流线路发生金属性单相接地故障时, 常规比相式和测距式距离保护性能均不受影响; 线路发生单相经过渡电阻接地故障时, 对于两种常规距离保护原理而言, 系统侧保护性能基本不受影响, 场站侧保护极易发生拒动。现有时域距离保护不受故障频偏、谐波的影响, 且有较强的抗过渡电阻能力, 然而在故障两侧零序阻抗角不一致时, 其可靠性较差, 无法应用于工程中。因此, 亟需研究高灵敏、高可靠应对单相接地故障的距离保护方法。

3 基于阻抗补偿的时域距离保护

3.1 附加阻抗计算方法

由于采用式(8)的方案, 未考虑故障点两侧零序电流相位差, 结合式(6), 解得等效阻抗近似表示为

$$R'_F = \frac{|\dot{I}_F|}{|3\dot{I}_{m0}|} R_F \quad (12)$$

参考式(4)有

$$Z_{\text{add}} = \frac{\dot{I}_F}{\dot{I}_m + 3K_Z \dot{I}_{m0}} R_F \quad (13)$$

将式(12)代入式(13)并化简, 可得

$$\begin{cases} Z_{\text{add}} = \frac{\dot{I}_F}{\dot{I}_{ma} + 3K_Z \dot{I}_{m0}} \frac{|3\dot{I}_{m0}|}{|\dot{I}_F|} R'_F = (k \cos \theta + jk \sin \theta) R'_F \\ k = \frac{3\dot{I}_{m0}}{\dot{I}_{ma} + 3K_Z \dot{I}_{m0}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: θ 为 \dot{I}_F 超前 $\dot{I}_{ma} + 3K_Z \dot{I}_{m0}$ 的角度。

考虑到场站侧故障电流与零序电流相位基本一致, θ 可按线路零序阻抗角与系统零序阻抗角差整定, 参数未知时 θ 也可按最大值整定为 12° ^[26]。式(14)中, $3\dot{I}_{m0}$ 和 $\dot{I}_{ma} + 3K_Z \dot{I}_{m0}$ 幅值比可进一步表示为

$$\frac{|3\dot{I}_{m0}|}{|\dot{I}_{ma} + 3K_Z \dot{I}_{m0}|} = \frac{|3\dot{I}_{m0}|}{|\dot{I}_{ma1} + \dot{I}_{ma2} + (1 + 3K_Z)\dot{I}_{m0}|} \quad (15)$$

在新能源侧负序电流抑制策略影响下, \dot{I}_{ma2} 基本为 0, 由于正序电流受控, \dot{I}_{ma0} 幅值远大于 \dot{I}_{ma1} , 式(15)可转化为式(16)。

$$\frac{|3\dot{I}_{m0}|}{|\dot{I}_{ma1} + \dot{I}_{ma2} + (1 + 3K_Z)\dot{I}_{m0}|} \approx \frac{3}{1 + 3K_Z} \quad (16)$$

因此 k 是一个可以估算的值,与线路参数有关,可以根据零序补偿系数直接求取,当然也可以提取工频分量实时计算 k 。本方案采用半周傅式算法提取相应工频分量的模值,实时计算 k 。

3.2 保护实现方案

3.2.1 时域中求解等效过渡电阻

根据 2.3 节现有时域距离保护原理,综合考虑保护速动性及稳定性,采用 5 ms 数据窗,2400 Hz 采样频率,当线路发生接地故障后,提取保护安装处电压、电流时域电气量信息,列写时域方程,最后采用最小二乘法求解等效过渡电阻 R'_f ,时域距离保护算法已较为成熟,在此不再赘述。

3.2.2 时域中求解故障测量阻抗

时域中列写式(17)所示等式。

$$u_{m_A}(t) = R_m(i_{m_A}(t) + 3K_1 i_{m_0}(t)) + L_m \frac{d(i_{m_A}(t) + 3K_1 i_{m_0}(t))}{dt} \quad (17)$$

式中: R_m 、 L_m 分别为测量电阻和电感,为未知数。采用和 3.2.1 节同样的数据窗、采样率和算法,可以求解。测量电抗 X_m 可根据 L_m 求解,因此该方法可解得包含过渡电阻影响的测量阻抗。

3.2.3 阻抗补偿

利用半周傅式算法提取 $3i_{m_0}$ 、 $i_{m_A} + 3K_2 i_{m_0}$ 的值,结合 3.2.1 中解得等效过渡电阻 R'_f ,利用附加阻抗对测量电阻、电抗进行补偿,判定补偿后的测量阻抗是否处于动作区,确定保护动作行为,考虑时域 5 ms 和傅式算法的填窗时间,保护动作取 15 ms 延时,保护整组动作时间在 20 ms 以内。

值得注意的是,由于角差 θ 较小, $\cos \theta$ 一定为正数,即故障附加电阻对短路电阻起助增作用,而 $\sin \theta$ 正负不确定,但其数值较小,即附加阻抗对测量电抗影响较小。

调整前的测量电阻、电抗和整定值比较可分 3 种情况。综合考虑保护的灵敏性和可靠性,根据比较结果采取不同方式构建测量阻抗补偿模型。

设补偿后的测量电阻为 R'_m 、测量感抗为 X'_m 。

$$1) R_m < R_{set}$$

由于故障附加电阻一定对测量电阻起助增作用,当 $R_m < R_{set}$ 时,故障位置一定在保护范围内,与 X_m 的计算结果无关,此时无需调整。

$$\begin{cases} R'_m = R_m \\ X'_m = X_m \end{cases} \quad (18)$$

$$2) R_m > R_{set}、X_m < X_{set}$$

此时可能是区内故障,但是由于过渡电阻影响

导致测量电阻过大,常规保护无法动作。此时也可能是区外故障,角差 θ 负数导致测量电抗偏小。因此参考式(4),按式(19)将过渡电阻引起的多余测量电阻去除,同时补偿缺少的测量电抗,最终使调整后的测量阻抗接近真实值。

$$\begin{cases} R'_M = R_M - kR'_f \cos \theta \\ X'_M = X_M + kR'_f \sin \theta \end{cases} \quad (19)$$

测量电阻采取反向补偿方法,测量电抗采取正向补偿方法,此时即使在 θ 、 R'_f 与实际值有轻微误差的情况下,在区外经过渡电阻故障时 R'_M 、 X'_M 总会有一项不满足动作条件,保护仍具有很高的可靠性。

$$3) R_m > R_{set}、X_m > X_{set}$$

当测量电抗在整定区外时,很有可能真实故障位置处于保护动作区外,为保证可靠性,可按式(20)所示方法调整故障电阻,但是不调整测量电抗,保证保护可靠不动作。

$$R'_m = R_m - kR'_f \cos \theta \quad (20)$$

4 仿真分析

基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真平台,搭建如图 9 所示测试系统仿真模型。风电场额定容量为 50 MW,经过 35 kV 母线及主变,最后通过 220 kV 风电场送出线将电能供给系统。

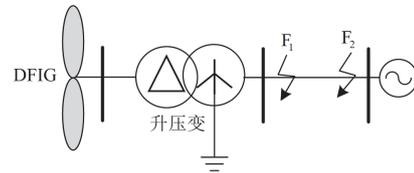


图 9 仿真系统示意图

Fig. 9 Schematic diagram of simulation system

送出线路长度为 50 km,单位正序电阻为 0.0705 Ω /km,正序电抗为 0.4 Ω ,零序电阻为 0.4 Ω ,零序电抗为 1.2 Ω 。以距离 I 段保护作为分析对象,假定保护范围为 80% 线路全长。此时整定电阻为 2.82 Ω ,整定电抗为 16 Ω 。设置线路中点 F_1 和线路末端 F_2 两个故障点。

4.1 传统距离保护动作情况

当 F_1 处经 2 Ω 小过渡电阻发生单相接地故障,以四边形动作区域为例,传统距离保护动作情况如图 10 所示。由于附加阻抗的作用,传统保护测量阻抗呈现阻性特征,测量阻抗轨迹无法进入保护动作区,保护拒动。

从仿真结果可知,即使是很小的过渡电阻故障也可能引起传统距离保护的拒动,而经本方案补偿

后的测量阻抗如图 11 所示, 测量电阻、电抗均在保护范围内, 且计算结果在故障后 15 ms 趋于稳定, 保护整组动作时间在 20 ms 以内。下面以常用的阻抗四边形动作区为例, 对不同工况下保护动作可靠性和灵敏度进行分析。

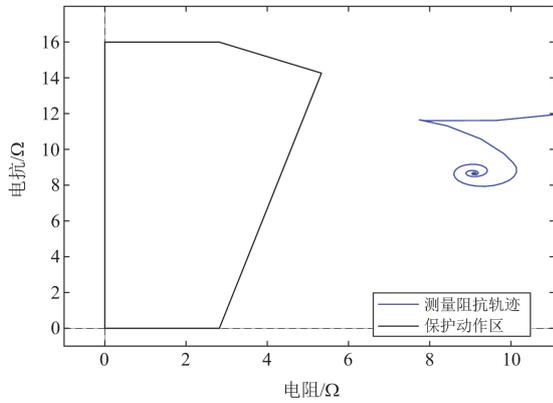


图 10 传统距离保护动作特性图

Fig. 10 Operating characteristic of traditional distance protection

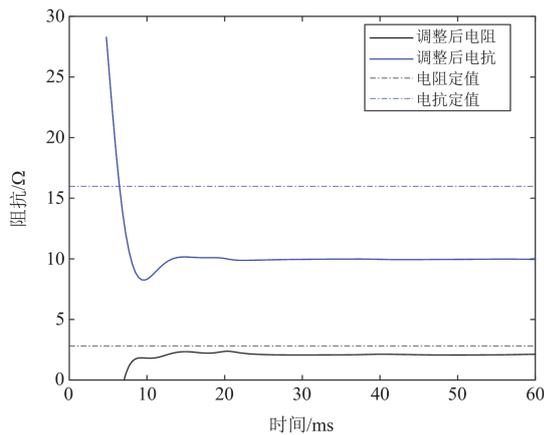


图 11 本方案距离保护动作特性图

Fig. 11 Operating characteristic of distance protection in this scheme

4.2 区内经过渡电阻距离保护动作情况

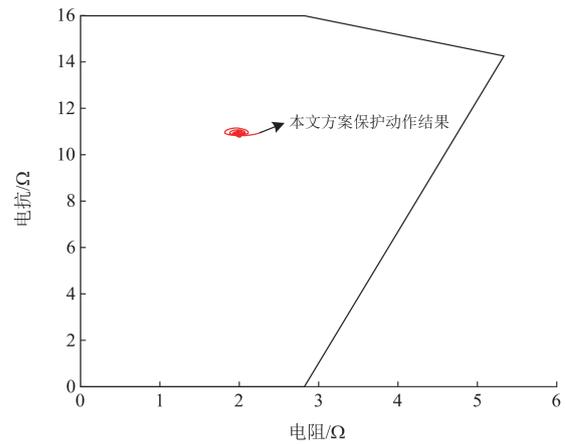
当 F_1 处经 50Ω 过渡电阻发生单相接地故障时, 仿真结果分别如图 12 所示, 同样位置模拟不同过渡电阻故障, 仿真结果如表 1 所示。

从仿真结果可知, 在区内经过渡电阻故障时, 常规时域距离保护和常规距离保护均有拒动现象, 而本方案有较高的抗过渡电阻能力。

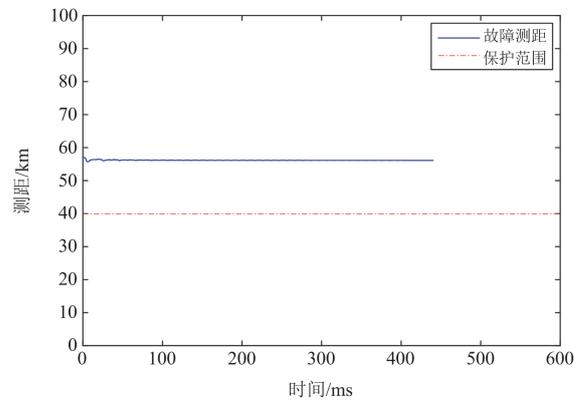
4.3 区外故障距离保护动作情况

当线路末端 F_2 处经 10Ω 过渡电阻发生单相接地故障时, 仿真结果如图 13 所示, 同样位置模拟不同过渡电阻故障, 仿真结果如表 2 所示。

据表 2 可知, 在区外经过渡电阻故障时, 常规时域距离保护误动, 而本文方案可靠不动作。



(a) 本文方案保护动作情况



(b) 常规时域距离保护故障测距结果

图 12 50%线路经 50Ω 过渡电阻故障动作对比图

Fig. 12 Fault action comparison diagram of 50% line through 50Ω transition resistance

表 1 50%线路经不同过渡电阻故障时保护动作对比

Table 1 Comparison of protection operations under different transition resistances at 50% line fault

过渡电阻/ Ω	常规距离	常规时域距离	本文方案
2	拒动	动作	动作
10	拒动	动作	动作
20	拒动	拒动	动作
50	拒动	拒动	动作

表 2 区外不同过渡电阻故障时保护动作结果

Table 2 Protection operation results under different transition resistances for external faults

过渡电阻/ Ω	常规距离	常规时域距离	本文方案
5	不动作	不动作	不动作
10	不动作	误动	不动作
15	不动作	误动	不动作
50	不动作	误动	不动作

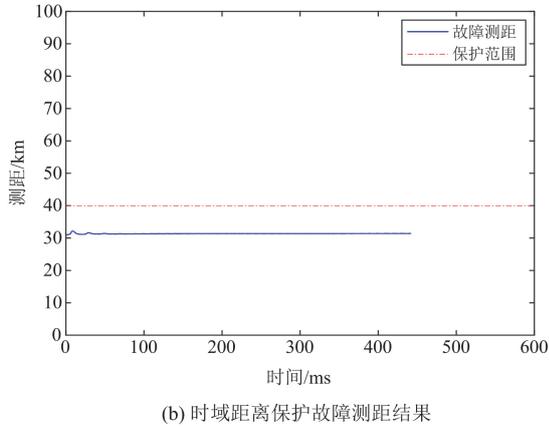
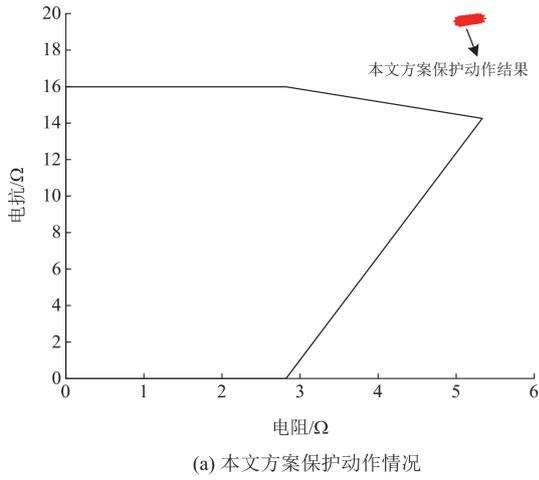


图 13 区外故障保护动作特性图

Fig. 13 Protection characteristics during external fault

5 结论

1) 本文通过对新能源接入系统单相接地距离保护适用性进行系统分析, 得出单相经过渡电阻故障时常规距离保护易拒动的结论, 并分析了时域距离保护在故障两侧零序阻抗角不一致时不正确动作的机理。

2) 基于常规时域距离保护提出一种高灵敏度、高可靠性的时域距离阻抗补偿方法, 并通过仿真验证了该原理的抗过渡电阻能力。

3) 所提方法受过渡电阻影响小、可靠性高, 能够提升接地距离保护的動作性能。

需要指出的是, 本文所提方法尚不能直接应用于相间经过渡电阻故障, 后续将对该问题进行深入研究。

附录 A

金属性单相接地故障特殊相各序分量的边界条件为

$$\begin{cases} \dot{U}_{F1} + \dot{U}_{F2} + \dot{U}_{F0} = 0 \\ \dot{I}_{F1} = \dot{I}_{F2} = \dot{I}_{F0} \end{cases} \quad (\text{A1})$$

式中: \dot{U}_{F1} 、 \dot{U}_{F2} 、 \dot{U}_{F0} 和 \dot{I}_{F1} 、 \dot{I}_{F2} 、 \dot{I}_{F0} 分别为故障点正、负、零序电压和电流, 以故障 A 相为例, 结合图 4, 故障点正序电压 \dot{U}_{Fa1} 与场站侧零序电流 \dot{I}_{a0} 的关系为

$$\dot{U}_{Fa1} = \dot{I}_{a0}(Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}) = C_{m0} \dot{I}_{Ma0}(Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}) \quad (\text{A2})$$

式中: $Z_{\Sigma 2}$ 为等效负序阻抗; C_{m0} 为零序电流分配系数, 近似为实数; $Z_{\Sigma 0}$ 为等效零序阻抗, 可表示为

$$\begin{cases} Z_{\Sigma 2} = Z_{NS2} + Z_{LN2} \\ Z_{\Sigma 0} = (Z_{MS0} + Z_{LM0}) // (Z_{Ns0} + Z_{LN0}) \end{cases} \quad (\text{A3})$$

式中: 假设线路各序阻抗角大致相等, 用变量 φ 代表线路正、负、零序阻抗角, 则 \dot{U}_{Fa1} 超前 \dot{I}_{Ma0} 的角度为 φ 。

对于场站侧, 在正序网络中又有

$$\dot{U}_{Fa1} = \dot{U}_{Ma1} - \dot{I}_{Ma1} Z_{LM1} \quad (\text{A4})$$

考虑新能源弱馈特性, 场站侧正序电流远小于零序电流, 结合式(A2)可知, 正序电压超前零序电流的角度为 φ 。

考虑正序电流受控及负序抑制策略, 场站侧保护安装处测量电压 \dot{U}_{Ma} 可表示为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Ma} &= (\dot{I}_{Ma} + 3K_Z \dot{I}_{Ma0}) Z_{LM1} = (\dot{I}_{Ma1} + \\ &(3K_Z + 1) \dot{I}_{Ma0}) Z_{LM1} \approx (3K_Z + 1) \dot{I}_{Ma0} Z_{LM1} \end{aligned} \quad (\text{A5})$$

相电压超前零序电流的角度约为 φ , 即相电压与正序同相位。

对于系统侧, 故障点正序电压与系统侧零序电流的关系可表示为

$$\dot{U}_{Fa1} = C_{n0} \dot{I}_{Na0} (Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}) \quad (\text{A6})$$

式中: C_{n0} 为零序电流分配系数, 近似为实数。

在正序网络中, 又有

$$\dot{U}_{Fa1} = \dot{U}_{Na1} - \dot{I}_{Na1} Z_{LN1} \quad (\text{A7})$$

系统侧保护安装处测量电压 \dot{U}_{Na} 可表示为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Na} &= (\dot{I}_{Na} + 3K_Z \dot{I}_{Na0}) Z_{LN1} = \\ &(\dot{I}_{Na1} + \dot{I}_{Na2} + (3K_Z + 1) \dot{I}_{Na0}) Z_{LN1} \end{aligned} \quad (\text{A8})$$

基于新能源弱馈特性和负序抑制策略, 故障点正序电流主要由系统侧提供, 负序电流全部由系统侧提供, 结合式(A1)的边界条件, 系统侧故障后各序电流相位基本一致, 将式(A7)代入式(A6)可得

$$\begin{cases} \dot{U}_{Na1} = C_{n0} \dot{I}_{Na0} (Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}) + c_1 \dot{I}_{Na0} \cdot Z_{LN1} \\ c_1 = \frac{\dot{I}_{Na1}}{\dot{I}_{Na0}} \end{cases} \quad (\text{A9})$$

式中: c_1 为实数。由式(A9)可知, \dot{U}_{Na1} 超前 \dot{I}_{Na0} 的角度近似为 φ 。

同理, 式(A8)可表示为

$$\begin{cases} \dot{U}_{Na} = c_2 \cdot \dot{I}_{Na0} \cdot Z_{LN1} \\ c_2 = \frac{\dot{I}_{Na1} + \dot{I}_{Na2} + (3K_Z + 1) \cdot \dot{I}_{Na0}}{\dot{I}_{Na0}} \end{cases} \quad (\text{A10})$$

式中: c_2 为实数。由式(A10)可知, \dot{U}_{Na} 超前 \dot{I}_{Na0} 的角度近似为 φ , 即 \dot{U}_{Na} 与 \dot{U}_{Na1} 同相位。

综上, 金属性故障时比相式距离保护不受新能源接入的影响。

参考文献

- [1] 卢正飞, 文明浩, 周瑜, 等. 逆变型分布式电源接入变电站高压线路距离保护新方法[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(2): 59-67.
LU Zhengfei, WEN Minghao, ZHOU Yu, et al. A novel distance protection method for high-voltage line in substation with integration of inverter-interfaced distributed generator[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 59-67.
- [2] 周前, 朱丹丹, 汪成根. 基于等效距离的源网储微电网故障保护方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 113-123.
ZHOU Qian, ZHU Dandan, WANG Chenggen. Fault protection method of source-grid-storage microgrid based on equivalent distance criteria[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 113-123.
- [3] 李会新, 陈祥文, 金明亮, 等. 常规直流逆变站交流送出线路距离保护适应性分析与对策[J]. 中国电力, 2024, 57(2): 115-126.
LI Huixin, CHEN Xiangwen, JIN Mingliang, et al. Adaptability analysis and countermeasures for distance protection of AC transmission lines connected LCC-HVDC inverter station[J]. Electric Power, 2024, 57(2): 115-126.
- [4] 戴志辉, 韦舒清, 柳梅元. 新能源送出线路工频变化量距离保护不正确动作机理分析[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(6): 74-86.
DAI Zhihui, WEI Shuqing, LIU Meiyuan. Analysis of the incorrect operation mechanism of power frequency variation-based distance protection in new energy transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(6): 74-86.
- [5] 许家焰, 武芳瑛, 李瑞, 等. 智能变电站继电保护二次虚回路失效风险动态识别技术[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(1): 160-170.
XU Jiayan, WU Fangying, LI Rui, et al. Dynamic identification technology for the failure risk of the secondary virtual circuit of relay protection in an intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(1): 160-170.
- [6] HOOSHYAR A, AZZOUEZ M A, EL-SAADANY E F. Distance protection of lines emanating from full-scale converter-interfaced renewable energy power plants-part I: problem statement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1770-1780.
- [7] 韩晋, 刘凯, 程淋伟, 等. 距离保护在双馈风电机组接入系统的应用分析[J]. 广东电力, 2024, 37(8): 35-44.
HAN Jin, LIU Kai, CHENG Linwei, et al. Application analysis of distance protection in DFIG access system[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(8): 35-44.
- [8] 张保会, 张金华, 原博, 等. 风电接入对继电保护的影响(六)——风电场送出线路距离保护影响分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 1-6.
ZHANG Baohui, ZHANG Jinhua, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (6): analysis of distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 1-6.
- [9] 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.
- [10] 侯俊杰, 樊艳芳, 王一波. 适用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 based on parameter identification for cluster wind power outgoing line[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 46-53.
- [11] 瞿继平, 吴兴全, 闫凯, 等. 光伏电站弱电源特性对送出线路继电保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 146-151.
QU Jiping, WU Xingquan, YAN Kai, et al. Influence of PV station weak power feature on relay protection of outgoing transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 146-151.
- [12] 戴志辉, 韩哲宇, 李杭泽. 基于相角差余弦值奇异熵的远海风电交流汇集线路单端量保护原理[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(4): 1-13.
DAI Zhihui, HAN Zheyu, LI Hangze. Single-ended protection principle for offshore wind power AC collection lines based on the singular entropy of the cosine value of phase angle difference[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(4): 1-13.
- [13] 洪丰, 吴通华, 郑玉平, 等. 柔性直流送出系统交流线路的自适应距离保护方法[J]. 电力系统自动化, 2023,

- 47(22): 25-32.
HONG Feng, WU Tonghua, ZHENG Yuping, et al. Adaptive distance protection method for AC lines connected with flexible DC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 25-32.
- [14] 李斌, 周博昊, 何佳伟, 等. 直驱风电场送出线路的正序电压极化距离保护适用性分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 16-24.
LI Bin, ZHOU Bohao, HE Jiawei, et al. Applicability analysis of distance protection with positive-sequence voltage polarization for transmission lines of wind farm with direct-driven turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 16-24.
- [15] 季亮, 俞紫琳, 李博通, 等. 基于提升距离保护适应性的改进 VSG 控制策略研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(6): 9-15, 70.
JI Liang, YU Zilin, LI Botong, et al. Improved VSG control strategy to enhance the adaptability of distance protection[J]. Smart Power, 2024, 52(6): 9-15, 70.
- [16] 晁晨栩, 郑晓冬, 叶海, 等. 针对海上风电场汇集线路单相接地故障的柔直侧新型距离保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 5899-5908.
CHAO Chenxu, ZHENG Xiaodong, YE Hai, et al. A novel MMC-side distance protection scheme for single-phase grounding fault of offshore wind farm collection line[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 5899-5908.
- [17] 晁晨栩, 郑晓冬, 邵能灵, 等. 针对新能源场站送出线两相短路的负序阻抗重构距离保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 101-109.
CHAO Chenxu, ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, et al. Distance protection based on negative-sequence impedance reconstruction for phase-to-phase short circuit of renewable power plant transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 101-109.
- [18] 叶远波, 王吉文, 汪胜和, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 180-187.
YE Yuanbo, WANG Jiwen, WANG Shenghe, et al. 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[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 180-187.
- [19] 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.
- [20] YANG Zhe, WANG Hongyi, LIAO Wenlong, et al. Protection challenges and solutions for AC systems with renewable energy sources: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(1): 18-39.
- [21] 戴志辉, 吴桐, 何静远, 等. 基于控保协同的有源配网主动注入式保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 94-103.
DAI Zhihui, WU Tong, HE Jingyuan, et al. An active distribution network active injection protection method based on control-protection coordination[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 94-103.
- [22] 程航, 曹五顺, 周明星. 不对称电网电压条件下直驱永磁风力发电机组并网逆变器的双电流闭环控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 66-72.
CHENG Hang, CAO Wushun, ZHOU Mingxing. Research on dual current-loop control strategy for grid-connected inverter of directly-driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator under unbalanced network voltage conditions[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 66-72.
- [23] 万佳, 王晓东, 付德义, 等. 风电机组低电压穿越过程特性参数智能辨识[J]. 电力科学与工程, 2025, 41(6): 11-18.
WAN Jia, WANG Xiaodong, FU Deyi, et al. Intelligent identification of characteristic parameters during the low voltage ride through process of wind turbines[J]. Electric Power Science and Engineering, 2025, 41(6): 11-18.
- [24] 王兴国, 于溯, 周泽昕, 等. 新能源电源控制故障响应对交流线路距离保护影响分析[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3834-3843.
WANG Xingguo, YU Shuo, ZHOU Zexin, et al. Action analysis of AC line distance protection considering new energy power control response[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3834-3843.
- [25] 李怀强, 张健康, 蒋嘉桁, 等. 西北电网 330 kV 尖樊线人工短路试验中接地距离保护适应性分析[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(3): 67-74, 90.
LI Huaiqiang, ZHANG Jiankang, JIANG Jiaheng, et al. Adaptability analysis of grounding distance protection of 330 kV Jian-Fan transmission line artificial short circuit test in Northwest Branch of State Grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(3): 67-74, 90.
- [26] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 4 版. 北京: 中国电力出版社, 2014.

收稿日期: 2025-04-18; 修回日期: 2025-08-25

作者简介:

王朝明(1995—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: wangzhaoming@sgepri.sgcc.com.cn

孙志攀(1993—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: sunzhipan@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 张颖)