

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221659

基于正序阻抗幅值比的风电场送出线路纵联保护

牛伟民¹, 樊艳芳¹, 侯俊杰¹, 张鑫宇², 马健^{2,3}

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;
3. 新疆电力系统全过程仿真重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 针对风电场送出线路纵联保护在数据延时传输及异常采样数据下保护性能不佳的问题, 提出了基于正序阻抗幅值比的纵联保护。通过分析风电系统送出线路发生区内、外故障时正序阻抗幅值特征, 得出区内、外故障下双端正序阻抗幅值差异比特征不同。引入综合层次聚类(balanced iterative reducing and clustering using hierarchies, BIRCH)方法剔除正序阻抗幅值序列中异常采样数据, 形成不含异常采样数据的故障时间序列聚类特征, 并结合双端正序阻抗幅值差异比特征, 构造不受数据延时传输影响的纵联保护判据。仿真结果表明, 所提出的纵联保护不受系统运行工况、故障类型、数据延时传输及异常采样数据的影响。在过渡电阻达到 150 Ω 时, 所提出的纵联保护仍能正确判别故障方向, 具有较强的抗噪性能, 适用于含风电接入的弱馈型电力系统。

关键词: 风电场; 纵联保护; 数据延时; 异常采样数据; BIRCH 方法

Pilot protection of wind farm transmission lines based on the positive sequence impedance amplitude ratio

NIU Weimin¹, FAN Yanfang¹, HOU Junjie¹, ZHANG Xinyu², MA Jian^{2,3}

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Whole Process Simulation of Power System, Urumqi 830011, China)

Abstract: To help solve protection performance problems of wind farm transmission line pilot protection in the data delay transmission and abnormal sampling data, this paper proposes a positive sequence impedance amplitude ratio based on pilot protection. By analyzing the positive sequence impedance amplitude characteristics of the wind power system transmission line inside and outside area, it is concluded that the positive sequence impedance amplitude difference ratio characteristics of the double-ended positive sequence impedance are different under the fault inside and outside area. The balanced iterative reducing and clustering using hierarchies (BIRCH) clustering method is introduced to remove the abnormal sampling data from the positive sequence impedance magnitude sequence and form the fault time series clustering features without abnormal sampling data. This is combined with the double-ended positive sequence impedance magnitude difference ratio features to construct the pilot protection criterion. This is not affected by the data delay transmission. The simulation results show that the proposed pilot protection is not affected by system operating conditions, fault type, data delay transmission nor abnormal sampling data. The proposed pilot protection can still correctly identify the fault direction when the transition resistance reaches 150 Ω. It has strong noise immunity and is suitable for weakly-fed power systems with wind power access.

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

Key words: wind farm; pilot protection; data delay; abnormal sampling data; BIRCH method

0 引言

在能源转型和日趋成熟的电力电子技术推动下, 大规模风电接入电力系统已成大势所趋^[1-5], 其

故障特征与常规电网不同, 使基于常规电网设计的传统保护存在适应问题^[6-10]。其中传统纵联保护因其诸多优点作为风电场送出线路的主保护, 受大规模风电接入影响, 传统纵联保护在原理上存在拒动、误动风险^[11], 电网安全稳定运行能力面临巨大挑战。开展适用于风电场送出线路的纵联保护研究具有重要意义。

针对传统纵联保护在风电场送出线路的适应问

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877185); 2022天山英才培养计划项目资助(2022TSYCLJ0019); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助(2022D01C662)

题已有相关研究。文献[12]通过仿真验证了传统纵联保护在大规模风电接入时存在拒动、误动的可能性,但未提出适用于风电场送出线路的纵联保护。文献[13]基于风电场送出线路区内故障时差动电压电流不符合电容模型、区外故障时差动电压电流符合电容模型特征,提出了不受频偏特性影响的时域故障分量模型识别纵联保护。学者利用风电场送出线路区内故障下时域全量故障模型特征差异,提出了避免频偏特性影响的时域全量模型识别纵联保护^[14]。上述基于模型识别的纵联保护新原理需保证双端数据通信严格同步,抗数据延时传输能力较差。学者利用风电场送出线路区内故障下两侧故障波形差异,提出了基于结构相似度与平方误差的纵联保护新原理^[15]。文献[16-18]利用风电场送出线路区内故障下两侧暂态电流波形差异,分别提出了基于斯皮尔曼等级相关系数的纵联保护新原理、基于余弦相似度的纵联保护新原理及基于皮尔逊波形相似度的纵联保护新原理。上述基于波形相似度的纵联保护新原理易受异常采样数据影响,可靠性较低,甚至存在拒动、误动风险。

综上,目前尚未提出较为契合风电接入电力系统且不受数据延时传输及异常采样数据影响的纵联保护。本文基于风电场接入电力系统背景,分析风电场送出线路发生区内外故障下双端正序阻抗幅值差异特征。引入 BIRCH 聚类方法,剔除故障时间序列中的异常数据,利用不含异常采样数据的故障时间序列聚类特征增强双端正序阻抗幅值差异特征,形成纵联保护判据并对保护性能进行理论分析。通过在 PSCAD/EMTDC 仿真中搭建风电场接入电力系统模型,验证了理论分析的正确性。

1 数据延时及异常数据对纵差保护的影响

随着智能化电气的发展,智能变电站因电子式互感器与智能开关的出现进入了数字化新阶段,解决了传统电磁式互感器 TA 饱和等问题。但是智能开关的加入使得数据传输环节增加,易出现数据延时传输的状况,并且电子式互感器因抗电磁干扰能力弱,易出现异常采样数据,致使纵联保护性能不佳^[19-20]。

1.1 数据延时对纵差保护性能的影响

计及纵差保护原理,当两端数据严格同步时,系统正常运行及区外故障下差动电流为 0,区内故障下差动电流较大,当差动电流与制动电流满足一定条件后才可动作。

纵差保护通常采用光纤通道传输信号,信号传输延时通常为 $5 \mu\text{s}/\text{km}$,信号在转换、加工、中继及交换机等环节中还要产生附加延时。考虑到智能变

电站的数据采集与传输环节较多,相比于常规保护装置,增加了合并单元的采样延时、保护采样延时和智能终端的延时环节。采样数据因上述延时环节易失去同步而产生相位差,产生相位误差不平衡差动电流和制动电流。随着延时误差的增大,延时误差会给差动电流计算带来明显误差,保护装置可能因采样数据失去同步而导致保护误动或拒动。

1.2 异常采样数据对纵差保护性能的影响

异常采样数据通常分为虚拟脉冲及数据缺失。针对虚拟脉冲对纵差保护性能的影响分析,目前通常使用傅里叶算法对采集到的信号进行数据提取及处理。当电磁干扰导致采集到的数据存在虚拟脉冲现象时,会产生较大的正向扰动量。根据傅里叶算法提取得到的基波分量将会出现较大的增量。对于纵差保护而言,当电流基波分量的增量值超过一定程度之后将会导致纵差保护判据的差动量大于动作门限值,保护出现误动。

在保护装置判别所用的核心网与基站间的空口传输受到空间电磁干扰时,易出现数据缺失情况。当出现数据缺失情况时,数据缺失点数越多,保护装置插值运算结果误差越大,致使纵差保护出现拒动、误动可能性越大。

通过上述分析可知,纵差保护在数据延时及异常采样数据下性能表现不佳,亟需提出不受数据延时传输及异常采样数据影响并适用于风电场送出线路的纵联保护。

2 双端正序阻抗幅值差异比特征

本文基于图 1 拓扑探讨风电场送出线路的双端正序阻抗幅值差异比特征,为提出不受数据延时传输及异常采样数据影响并适用于风电场送出线路的纵联保护新方案奠定基础。

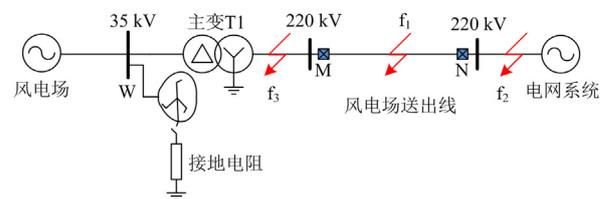


图 1 风电场接入电力系统拓扑

Fig. 1 Topology of wind power connected to the power system

图 1 对应正序故障分解图如图 2 所示。其中： $E_{\Sigma W1}$ 为风电场等值正序电源； E_{S1} 为系统等值正序电源； U_{M1} 、 I_{M1} 分别为 M 侧正序电压、电流； U_{N1} 、 I_{N1} 分别为 N 侧正序电压、电流； $Z_{\Sigma W1}$ 为计及接地变压器影响的 W 侧综合正序阻抗； Z_{S1} 为系统等值

正序阻抗; Z_{T1} 为主变正序阻抗; Z_{L1} 为线路正序阻抗。

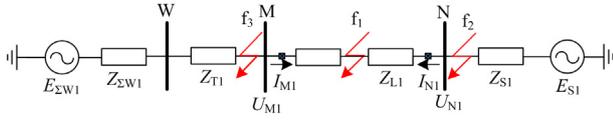


图2 正序故障网络分解图

Fig. 2 Decomposition diagram of positive sequence fault network

风电场容量远小于系统容量且风电场内部电力电子设备较多, 耐电压、电流能力差, 故障时提供的短路电流较小, 致使风电场正序阻抗远大于系统正序阻抗^[21-24]。接地变压器在系统正常运行及故障情况下, 其正序阻抗呈现高阻抗特征^[25]。综合上述特征可知, 经阻抗折算并计及接地变压器影响的 W 侧综合正序阻抗幅值 $|Z_{\Sigma W1}|$ 仍远大于系统等值正序阻抗幅值 $|Z_{S1}|$ 。

当风电场送出线路区内 f_1 处发生故障时, 计及阻抗折算的 M、N 双端正序阻抗幅值存在如下差异特征:

$$\begin{cases} \| |Z_{M1}| - |Z_{N1}| \| = \| |Z_{\Sigma W1}| - |Z_{S1}| \| \gg 0 \\ \| |Z_{M1}| + |Z_{N1}| \| = \| |Z_{\Sigma W1}| + |Z_{S1}| \| \gg 0 \\ |Z_{M1}| = |Z_{\Sigma W1}| \gg |Z_{L1}| \end{cases} \quad (1)$$

式中: Z_{M1} 为 M 侧正序阻抗; Z_{N1} 为 N 侧正序阻抗。

当风电场送出线路区外 f_2 处发生故障时, 计及阻抗折算的 M、N 双端正序阻抗幅值存在如下差异特征:

$$\begin{cases} \| |Z_{M1}| - |Z_{N1}| \| = \| |Z_{\Sigma W1}| - |Z_{\Sigma W1} + Z_{L1}| \| \geq 0 \\ \| |Z_{M1}| + |Z_{N1}| \| = \| |Z_{\Sigma W1}| + |Z_{\Sigma W1} + Z_{L1}| \| \gg 0 \\ |Z_{M1}| = |Z_{\Sigma W1}| \gg |Z_{L1}| \end{cases} \quad (2)$$

当风电场送出线路区外 f_3 处发生故障时, 计及阻抗折算的 M、N 双端正序阻抗幅值存在如下差异特征:

$$\begin{cases} \| |Z_{M1}| - |Z_{N1}| \| = \| |Z_{S1} + Z_{L1}| - |Z_{S1}| \| \geq 0 \\ \| |Z_{M1}| + |Z_{N1}| \| = \| |Z_{S1} + Z_{L1}| + |Z_{S1}| \| \geq 0 \\ |Z_{M1}| = |Z_{S1} + Z_{L1}| \end{cases} \quad (3)$$

基于上述风电场送出线路双端正序阻抗幅值差异特征, 引入双端正序阻抗幅值差异比因子 δ 。

$$\delta = \frac{\| |Z_{M1}| - |Z_{N1}| \|}{\| |Z_{M1}| + |Z_{N1}| \|} \quad (4)$$

当区内 f_1 处发生故障时, 结合式(1)可知 δ 趋近于 1。当区外 f_2 处发生故障时, 结合式(2)可知 δ 趋近于 0。当区外 f_3 处发生故障时, Z_{M1} 、 Z_{N1} 中均不含风电场阻抗分量且表现为电抗特性, 阻抗角近似

为 90° ^[26], 除了 $|Z_{M1}| \geq |Z_{L1}|$ 的特征, 还可得如下推导:

$$\delta = \frac{\| |Z_{M1}| - |Z_{N1}| \|}{\| |Z_{M1}| + |Z_{N1}| \|} = \frac{|Z_{L1}|}{|Z_{L1}| + 2|Z_{S1}|} \quad (5)$$

当 $|Z_{L1}| \leq |Z_{S1}|$ 时, 可得 $\delta \leq 0.33$; 当 $|Z_{L1}| > |Z_{S1}|$ 时, 可得 δ 处于 0.33~1 区间, 即该情况下存在不能区分区内 f_1 处故障与区外 f_3 处故障的可能。

针对上述问题, 计及在 f_1 处及 f_3 处故障下 M 侧正序阻抗幅值特征差异, 通过引入 M 侧正序阻抗幅值比 ΔZ_{M1} 区分区内 f_1 处故障与区外 f_3 处故障。正序阻抗幅值比 ΔZ_{M1} 计算公式如式(6)。

$$\Delta Z_{M1} = \frac{|Z_{M1}|}{\| |Z_{L1}| + |Z_{S1}| \|_{\max}} \quad (6)$$

当 f_1 、 f_2 处故障时, $|Z_{M1}|$ 主要分量为 $|Z_{\Sigma W1}|$, 正序阻抗幅值比 ΔZ_{M1} 远大于 1; 当 f_3 处故障时, $|Z_{M1}|$ 主要分量为 $|Z_{L1} + Z_{S1}|$, 正序阻抗幅值比 $\Delta Z_{M1} \leq 1$ 。

结合上述分析, 可得表 1。

表 1 判据因子与故障位置关系

Table 1 Relationship between criterion factor and fault location

故障位置	ΔZ_{M1}	δ
区内 f_1 故障	$\Delta Z_{M1} \gg 1$	$\delta \rightarrow 1$
区外系统侧 f_2 故障	$\Delta Z_{M1} \gg 1$	$\delta \rightarrow 0$
区外主变侧 f_3 故障	$\Delta Z_{M1} \leq 1$	$0 < \delta < 1$

综上, 利用 M 侧正序阻抗幅值比 ΔZ_{M1} 特征及双端正序阻抗幅值差异比因子 δ 特征, 构成纵联保护新方案。

3 纵联保护新方案构造及性能分析

针对风电场短路电流存在频率偏移特性问题, 采用带通滤波器滤除电压、电流信号中 35~65 Hz 以外数据, 再利用 Prony 算法提取滤波数据中的工频分量, 避免频偏特性影响。考虑到数据延时传输及异常采样数据干扰的影响, 引入 BIRCH 聚类算法, 对正序阻抗故障时间序列进行聚类分析, 去除仅含有少量离散点数的叶结点。结合风电场送出线路双端正序阻抗幅值差异比特征, 利用 BIRCH 聚类算法聚类特征分析 $|Z_{M1}|$ 及 $|Z_{N1}|$ 故障时间序列, 形成不受数据延时传输及异常采样数据影响的纵联保护。BIRCH 聚类算法聚类速度快, 可识别噪音点及剔除异常数据。基于该聚类算法计算所得的聚类特征可增强双端正序阻抗幅值差异特征。

3.1 基于 BIRCH 算法的故障时间序列聚类

BIRCH 聚类算法通过对故障时间序列的分析, 形成聚类特征。聚类特征定义为 $CF = (n, LS, SS)$,

其中 n 为目标序列 $\{x_i, i=1, 2, \dots, n\}$ 离散点数, LS 、 SS 分别为

$$LS = \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

$$SS = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (8)$$

通过对故障时间序列的全局分析并结合 CF 可推导出故障时间序列的形心 x_0 、半径 r 分别为

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{LS}{n} \quad (9)$$

$$r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}} = \sqrt{\frac{nSS - 2LS^2 + nLS^2}{n^2}} \quad (10)$$

根据 CF 可建立聚类特征树(CF Tree), CF Tree 中非叶子结点最大离散点数为 B , 空间阈值为 T (通常为半径 r)。

基于 $BIRCH$ 算法的故障时间序列聚类步骤如下。

1) 扫描故障时间序列全部数据, 计算故障时间序列的半径 r , 建立 CF Tree;

2) 以输入的第一个离散数据作为该叶子结点的根结点, 后续故障时间序列数据输入后判定其与根结点距离是否小于 T , 若小于且该叶子结点总离散点数不超过 B , 则汇入该叶子结点, 否则作为新的叶子结点的根结点进行聚类;

3) 扫描聚类完成后的 CF Tree, 将其中仅含有少量离散点数的异常叶子结点删除, 完成故障时间序列的聚类。

3.2 保护方案

3.2.1 起动元件动作判据

风电场因弱电源特性致使其提供短路电流能力较差, 当 f_1 处发生故障时, 传统起动元件在 M 侧存在不适用问题。结合 M 侧正序阻抗幅值特征分析, 本文将以 M 侧正序阻抗幅值比 ΔZ_{M1} 作为 M 侧起动元件动作判据, 如式(11)。

$$\Delta Z_{M1} \geq \Delta Z_{set} \quad (11)$$

式中, ΔZ_{set} 为起动元件整定值。

根据表 1 可知, ΔZ_{M1} 在 f_1 处、 f_2 处及 f_3 处故障呈现特征不同, 令 $\Delta Z_{set} = \Delta Z_{1b}/k_1 k_2$ 。其中: k_1 为计及数据测量误差的可靠系数, 选取为 0.85; k_2 为计及数据传输延时的可靠系数, 选取为 0.95, 取边界值 $\Delta Z_{1b} = 1$, 即 $\Delta Z_{set} = 1.24$ 。

当 f_1 、 f_2 及 f_3 处发生故障时, 传统起动元件在 N 侧可正常判别, 计及风电场出力波动因素, 选取

正序突变量电流起动元件, 当 $\Delta I_{N1} \geq 0.2I_{N1}$ 时, N 侧发出允许纵联保护进行区内故障判别信号。

综上, 计及异常数据影响, 当 M 侧持续 3 ms 满足 $\Delta Z_{M1} \geq \Delta Z_{set}$, N 侧持续 3 ms 满足 $\Delta I_{N1} \geq 0.2I_{N1}$ 时, 认为可能存在故障, 起动元件动作。

3.2.2 保护判据

对采集到的电压、电流信号数据预处理后计算 $|Z_{M1}|$ 及 $|Z_{N1}|$, 以 10 ms 数据窗提取 $|Z_{M1}|$ 及 $|Z_{N1}|$ 的故障时间序列, 分别对 $|Z_{M1}|$ 及 $|Z_{N1}|$ 的故障时间序列进行 $BIRCH$ 聚类, 剔除 $|Z_{M1}|$ 及 $|Z_{N1}|$ 内异常数据。形成剔除异常数据后的 $|Z_{M1}|$ 及 $|Z_{N1}|$ 叶子结点 CF , 对 CF 参数中的 LS 、 SS 进行求和。为消除剔除异常数据后的 $|Z_{M1}|$ 及 $|Z_{N1}|$ 故障时间序列存在的数据不对等影响, 对式(4)进行改进。

改进后的式(4)为

$$\delta_p = \frac{|\Sigma SS_M - \Sigma SS_N|}{\Sigma SS_M + \Sigma SS_N} \quad (12)$$

结合双端正序阻抗幅值特征分析, 式(12)中的双端正序阻抗幅值差异比因子 δ_p 与故障位置关系与表 1 相同。根据表 1 可知, $\delta_{pmax} = 1$, $\delta_{pmin} = 0$, 区内 f_1 处故障 δ_p 趋近于 1, 区外 f_2 处故障 δ_p 趋近于 0, 区外 f_3 处故障 δ_p 处于 0~1 区间。根据上述分析, 取边界值 $\delta_{pb} = 1$, 令 $\delta_{pset} = k_1 k_2 \delta_{pb}$, 经计算得 $\delta_{pset} = 0.8$ 。

综上, 纵联保护新方案如图 3 所示。当检测到 M 、 N 侧均满足起动元件动作判据时, 对 $|Z_{M1}|$ 及 $|Z_{N1}|$

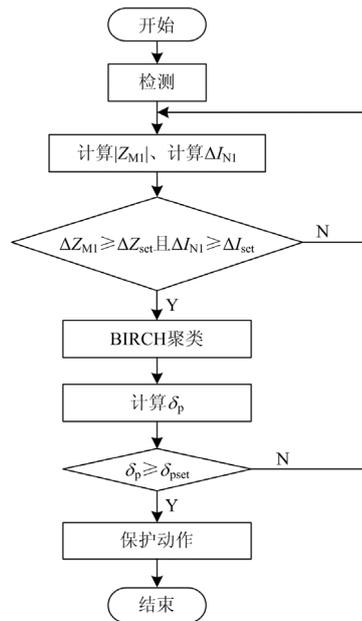


图 3 纵联保护新方案流程图

Fig. 3 Flow chart of the new pilot protection

故障时间序列进行 BIRCH 聚类, 剔除异常采样数据并形成 CF。将各参数代入式(12)与其整定值进行比较, 若满足条件, 保护动作, 反之, 保护不动作。

3.3 保护性能分析

1) 过渡电阻对保护性能的影响

针对起动元件动作判据, 当风电场送出线路 f_1 处发生区内故障时, $|Z_{M1}|$ 故障时间序列反映的是风电场正序阻抗幅值, 与过渡电阻无关; N 侧提供短路电流能力较强, 过渡电阻对正序突变量电流起动元件影响较小。针对纵联保护动作判据, 当风电场送出线路 f_1 处发生区内故障时, $|Z_{M1}|$ 及 $|Z_{N1}|$ 故障时间序列分别反映的是风电场、系统正序阻抗幅值; 当风电场送出线路 f_2 处发生区外故障时, $|Z_{M1}|$ 及 $|Z_{N1}|$ 故障时间序列反映的是风电场正序阻抗幅值; 当风电场送出线路 f_3 处发生区外故障时, $|Z_{M1}|$ 故障时间序列反映的是系统正序阻抗及风电场送出线路正序阻抗幅值, $|Z_{N1}|$ 故障时间序列反映的是系统正序阻抗幅值。无论是区内故障或区外故障, $|Z_{M1}|$ 及 $|Z_{N1}|$ 故障时间序列均与过渡电阻无关。

2) 数据延时传输对保护性能的影响

本文所提纵联保护在进行区内外故障判别前, 需同时满足 M、N 侧起动元件动作判据。起动元件会因数据延迟传输推迟纵联保护区内外故障判别时间, 但当满足两侧起动元件动作判据时, $|Z_{M1}|$ 及 $|Z_{N1}|$ 故障时间序列在区内外故障下幅值特征差异明显, 纵联保护可正确判别区内外故障。

3) 异常采样数据对保护性能的影响

针对数据缺失对保护性能的影响分析, 起动元件的动作判据须持续满足 3 ms, 起动元件受数据缺失影响存在略微延迟动作的可能; 分析式(12)在风电场送出线路区内外故障下表征差异可知, 通过双端故障时间序列形成的纵联保护判据可不受数据缺失影响。针对虚拟脉冲对保护性能的影响分析, 起动元件动作判据因风电场送出线路区内外故障下 $|Z_{M1}|$ 故障时间序列幅值特征差异而不受虚拟脉冲影响; 通过 BIRCH 聚类算法可剔除异常数据点, 以剔除异常数据后的 $|Z_{M1}|$ 及 $|Z_{N1}|$ 故障时间序列形成的保护判据, 不受虚拟脉冲影响。

4) 噪声干扰对保护性能的影响

针对噪声干扰对保护性能影响分析和虚拟脉冲对保护性能影响分析, 起动元件动作判据及纵联保护判据均因双端正序阻抗幅值差异比特征而不受噪声干扰影响。

4 仿真验证

为验证本文对双端正序阻抗幅值差异比特征分析及纵联保护新方案理论的正确性, 在 PSCAD/ETMDC 搭建如图 1 所示的风电场接入电力系统模型。风电场由 33 台 1.5 MW 风机组成。单台 DFIG 参数为: 额定容量为 1.5 MW, 额定电压为 690 V, 转子电阻 $R_r = 0.009$ p.u., 定子电阻 $R_s = 0.008$ p.u., 转子电感 $L_r = 0.145$ p.u., 定子电感 $L_s = 0.172$ p.u., 激磁电感 $L_m = 2.5$ p.u.。DFIG 基准值为其额定电压及额定容量。接地变压器的接地电阻为 100 Ω , 主变容量为 100 MW, 额定电压变比为 220 kV/35 kV, 短路阻抗比为 12%, 采用 YNd11 接线方式。送出线长度为 60 km, 线路参数为 $r_1 = 0.132 \Omega/\text{km}$, $x_1 = j0.386 \Omega/\text{km}$, 系统侧等值正序阻抗为 $(0.1 + j3.1416) \Omega$ 。基准电压 $U_b = 220$ kV, 基准容量 $S_b = 1000$ MW, 采样率为 4 kHz。

4.1 双端正序阻抗幅值差异比特征验证

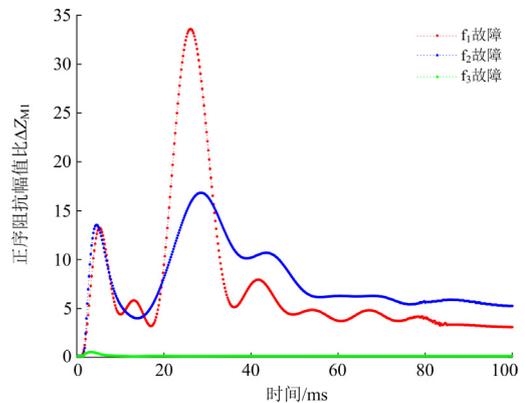
为验证风电场送出线路区内 f_1 、区外 f_2 及 f_3 处故障的双端正序阻抗幅值差异比特征, 以 A 相金属性接地为例, 结合式(4)及式(6)可得图 4。

图 4 中红色点划线代表风电场送出线路区内 f_1 处故障下保护因子, 蓝色点划线代表风电场送出线路区外 f_2 处故障下保护因子, 绿色点划线代表风电场送出线路区外 f_3 处故障下保护因子。将图 4(a)、图 4(b)与表 1 进行对比, 验证了双端正序阻抗差异比特征的正确性。

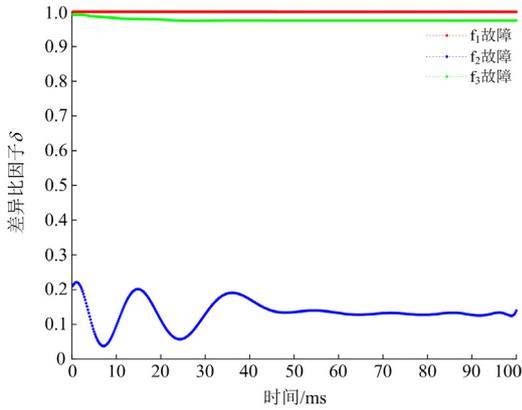
4.2 纵联保护新方案性能验证

4.2.1 故障位置与故障类型的影响

设置风电场送出线路区内 f_1 、区外 f_2 及 f_3 处发生故障, 故障类型为 A 相接地短路、AB 相间短路、ABG 接地短路及 ABC 短路故障。选取故障后 10 ms 内数据为 $|Z_{M1}|$ 及 $|Z_{N1}|$ 故障时间序列, 可得不同故障位置及故障类型对保护性能的影响, 如表 2 所示。



(a) M侧正序阻抗幅值比 ΔZ_{M1} 特征



(b) 双端正序阻抗幅值差异比 δ 因子特征
图4 双端正序阻抗幅值特征图

Fig. 4 Amplitude characteristic diagram of double-ended positive sequence impedance

表2 不同故障位置与故障类型下的保护性能
Table 2 Protection performance under different fault locations and fault types

故障位置	故障类型	ΔZ_{M1max}	δ_p	判定结果
f_1	AG	13.3628	0.9999	区内
	AB	14.9227	0.9999	区内
	ABG	14.2233	0.9999	区内
	ABC	15.6234	0.9999	区内
f_2	AG	13.5541	0.2225	区外
	AB	14.1768	0.2347	区外
	ABG	14.1563	0.2116	区外
f_3	AG	0.5086	0.9912	区外
	AB	0.9326	0.9941	区外
	ABG	0.7840	0.9948	区外
	ABC	0.9942	0.9950	区外

由表2可知,区内 f_1 处发生各类故障时, M侧起动元件均正常动作,纵联保护均可靠动作;区外 f_2 及 f_3 处发生各类故障时, M侧起动元件均正确判别,纵联保护不动作。验证了所提纵联保护在不同故障位置及故障类型下具有正确判别区内外故障的能力。

4.2.2 过渡电阻的影响

以风电场送出线路区内 f_1 、区外 f_2 及 f_3 处发生A相接地故障为例,验证过渡电阻对纵联保护的影响。计及220 kV送出线路最大过渡电阻为100 Ω ,设置过渡电阻为75 Ω 和150 Ω 。过渡电阻对纵联保护性能的影响如表3所示。

由表3可知, f_1 处发生A相高阻接地故障时, M侧起动元件正常动作,纵联保护可靠动作; f_2 及

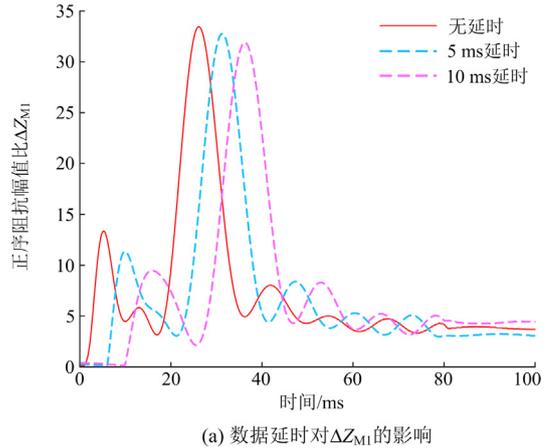
f_3 处发生A相高阻接地故障时, M侧起动元件正常判别,纵联保护不动作。验证了3.3节中纵联保护新方案抗过渡电阻能力理论分析的正确性。

表3 过渡电阻对保护性能的影响
Table 3 Influence of transition resistance on protection performance

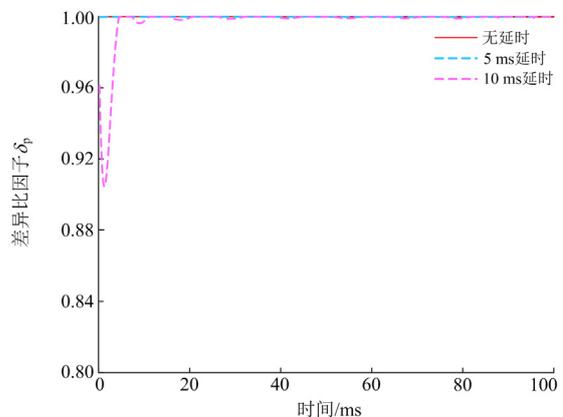
故障位置	过渡电阻/ Ω	ΔZ_{M1max}	δ_p	判定结果
f_1	75	15.2105	0.9999	区内
	150	11.6193	0.9999	区内
f_2	75	6.5740	0.0985	区外
	150	5.8070	0.1175	区外
f_3	75	0.6916	0.9909	区外
	150	0.6535	0.9907	区外

4.2.3 数据延时传输的影响

以设置风电场送出线路区内 f_1 处发生A相接地故障为例,探讨数据延时传输对保护性能的影响。设置 $|Z_{M1}|$ 故障时间序列延时5 ms、10 ms, $|Z_{N1}|$ 故障时间序列正常传输,结合式(6)及式(12)可得图5。



(a) 数据延时对 ΔZ_{M1} 的影响



(b) 数据延时对 δ_p 的影响

图5 数据延时对保护性能的影响

Fig. 5 Impact of data delay on protection performance

图 5 中红色实线为正常传输的验证结果, 青蓝色虚线为 M 侧延时 5 ms 传输的验证结果, 洋红色虚线为 M 侧延时 10 ms 传输的验证结果。由图 5(a) 可知, M 侧数据延时传输导致 M 侧起动元件动作判据延时后满足要求。由图 5(b) 可知, 当两侧动作判据均满足后, 保护准确判别故障位置。其中 δ_p 基本不受数据延时传输影响。验证了 3.3 节中数据延时对纵联保护新方案影响理论分析的正确性, 纵联保护具有较强的抗数据延时传输能力。

4.2.4 异常采样数据的影响

以设置风电场送出线路区内 f_1 处发生 A 相金属性接地故障为例, 探讨异常采样数据对保护性能的影响。设置 M 侧 $|Z_{M1}|$ 故障时间序列每 5 ms 出现数据缺失或虚拟脉冲, N 侧 $|Z_{N1}|$ 故障时间序列正常传输, 结合式(6)及式(12)可得图 6。

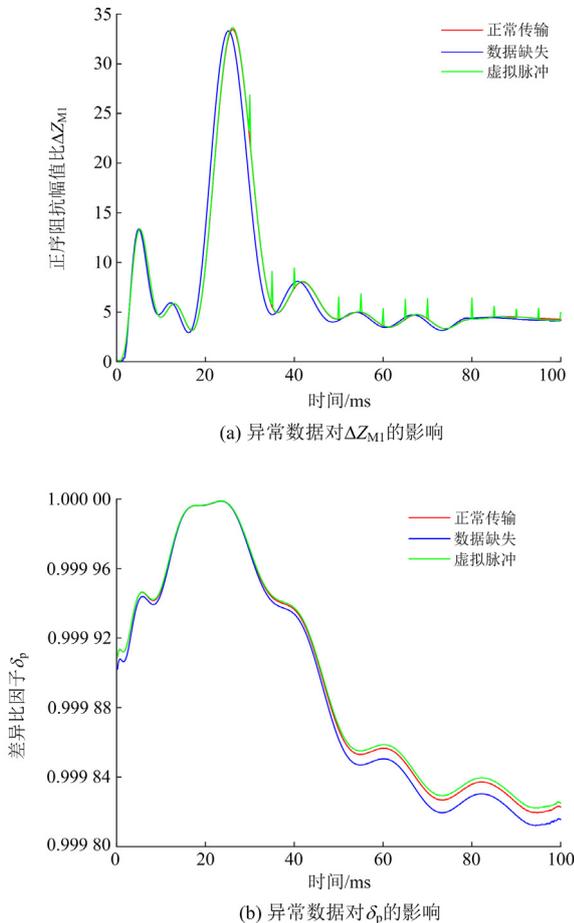


图 6 异常数据对保护性能的影响

Fig. 6 Impact of abnormal data on protection performance

图 6 中红色实线为正常传输结果, 蓝色实线为 M 侧发生数据缺失结果, 绿色实线为 M 侧发生虚拟脉冲结果。由图 6(a) 可知, 起动元件动作判据基

本不受数据缺失及虚拟脉冲影响。由图 6(b) 可知, 保护判据基本不受数据缺失及虚拟脉冲影响。验证了 3.3 节中异常采样数据对纵联保护新方案影响理论分析的正确性, 异常数据对纵联保护影响较小。

4.2.5 噪声干扰的影响

以设置风电场送出线路区内 f_1 、区外 f_2 及 f_3 处发生 A 相金属性接地故障为例, 讨论噪声干扰对保护性能的影响。选取信噪比分别为 10、20、30 及 40 dB 的高斯白噪声, 加在 $|Z_{M1}|$ 及 $|Z_{N1}|$ 故障时间序列, 根据图 3 流程图可得表 4。

表 4 噪声干扰对保护性能的影响

Table 4 Influence of noise interference on protection performance

故障位置	信噪比/dB	ΔZ_{M1max}	δ_p	判定结果
f_1	10	13.8590	0.9999	区内
	20	13.5975	0.9999	区内
	30	13.6116	0.9999	区内
	40	13.5878	0.9997	区内
f_2	10	14.9438	0.2219	区外
	20	14.9236	0.2245	区外
	30	14.9171	0.2224	区外
	40	14.9006	0.2224	区外
f_3	10	0.4884	0.9915	区外
	20	0.5203	0.9913	区外
	30	0.5059	0.9913	区外
	40	0.5085	0.9912	区外

由表 4 可知, 所提纵联保护在不同故障位置及不同噪声强度下均可正确判别区内外故障。验证了 3.3 节中噪声干扰对纵联保护新方案影响理论分析的正确性, 纵联保护抗噪性能表现良好。

5 结论

本文利用风电场送出线路双端正序阻抗幅值特征在不同故障位置的差异, 提出了一种基于正序阻抗幅值比的风电场送出线路纵联保护新原理, 得到以下结论:

1) 受电力电子装置影响, 风电场展现弱馈特性, 其等值正序阻抗幅值与系统等值正序阻抗幅值存在明显差异, 以此形成的双端正序阻抗幅值差异比特征是本文所提纵联保护的基础。

2) 基于正序阻抗幅值比的纵联保护能可靠、灵敏地判别风电场送出线路区内、外短路故障, 在高阻接地故障下仍具有良好性能。

3) 仿真验证了所提保护原理的有效性, 所提保护不受异常数据影响, 具有较强的抗数据传输延时及抗噪能力, 适用于含风电接入的弱馈型电力系统。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 侯俊杰, 宋国兵, 常鹏, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 106-116.
HOU Junjie, SONG Guobing, CHANG Peng, et al. Time-domain distance protection for a wind power system considering parameters of the remote end system and influence of outgoing line distribution parameters[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 106-116.
- [3] 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.
- [4] SONG Guobing, WANG Chenqing, WANG Ting, et al. A phase selection method for wind power integration system using phase voltage waveform correlation[C] // 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 5-10, 2018, Portland, OR, USA.
- [5] 于淼, 汤亚芳, 黄亦欣, 等. 双馈风机控制方式对继电保护影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 180-187.
YU Miao, TANG Yafang, HUANG Yixin, et al. Research on the influence of control mode of DFIG on relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 180-187.
- [6] TAO Renfeng, LI Fengting, CHEN Weiwei, et al. Research on the protection coordination of permanent magnet synchronous generator based wind farms with low voltage ride through capability[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(3): 311-319.
- [7] 王春又, 孙士云, 毛肖, 等. 适应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.
- [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 Yuping, CAI Chao. Analysis of phase angle characteristics of DFIG equivalent sequence superimposed impedances and its impact on fault components based direction relay[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3929-3940.
- [9] 饶鸿江. 风电场站送出线路纵联保护及故障测距新方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [10] 马健, 樊艳芳, 李锋, 等. 适用于集群风电场送出线的选相元件研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(9): 1217-1225.
MA Jian, FAN Yanfang, LI Feng, et al. Research on fault phase selection method for cluster wind farm outgoing line[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(9): 1217-1225.
- [11] 王春又. 双馈风机接入对线路继电保护影响及保护策略研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [12] 钟显, 樊艳芳, 王一波. 双馈集群汇集站主变及送出线路继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 47-54.
ZHONG Xian, FAN Yanfang, WANG Yibo. Research of transformer and outgoing line protection of collection station where cluster of double-fed wind farms put in[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 47-54.
- [13] 宋国兵, 王晨清, 唐吉斯, 等. 适用于风电接入系统的时域模型识别纵联保护新原理[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3580-3585.
SONG Guobing, WANG Chenqing, TENG Jisi, et al. Novel pilot protection based on time-domain model identification for wind power integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3580-3585.
- [14] 侯俊杰, 樊艳芳, 晁勤, 等. 基于时域全量故障模型相关性判别的集群风电送出线纵联保护[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 89-96.
HOU Junjie, FAN Yanfang, CHAO Qin, et al. Cluster wind power outgoing line pilot protection scheme based on time-domain full-frequency fault model correlation identification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 89-96.
- [15] 郑黎明, 贾科, 毕天姝, 等. 基于结构相似度与平方误差的新能源场站送出线路纵联保护综合判据[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1788-1797.
ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Comprehensive criteria of pilot protection based on structural similarity and square error for outgoing line from renewable power plants[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1788-1797.

- [16] 贾科, 杨哲, 魏超, 等. 基于斯皮尔曼等级相关系数的新能源送出线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 103-111.
JIA Ke, YANG Zhe, WEI Chao, et al. Pilot protection based on Spearman rank correlation coefficient for transmission line connected to renewable energy source[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 103-111.
- [17] 贾科, 郑黎明, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的风电场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6263-6275.
JIA Ke, ZHENG Liming, BI Tianshu, et al. Pilot protection based on cosine similarity for transmission line connected to wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6263-6275.
- [18] 毕天姝, 李彦宾, 贾科, 等. 基于暂态电流波形相关性的新能源场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2012-2019, 2216.
BI Tianshu, LI Yanbin, JIA Ke, et al. Transient current waveform similarity based pilot protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2012-2019, 2216.
- [19] 张旭泽, 郑永康, 康小宁, 等. 智能变电站继电保护系统所面临的若干问题[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 90-96.
ZHANG Xuze, ZHENG Yongkang, KANG Xiaoning, et al. Several problems of intelligent substation relay protection system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 90-96.
- [20] 余磊, 贾科, 温志文, 等. 计及量测数据丢失的主动配电网电流保护自适应整定方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 145-152.
YU Lei, JIA Ke, WEN Zhiwen, et al. Adaptive setting method of over current protection in active distribution network considering measurement data missing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 145-152.
- [21] 黄涛, 陆于平, 凌启程, 等. 撬棒电路对风电场侧联络线距离保护的影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 30-36.
HUANG Tao, LU Yuping, LING Qicheng, et al. Impact of crowbar on wind farm side interconnection line distance protection and mitigation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 30-36.
- [22] 王晨清, 宋国兵, 刘凯, 等. 突变量保护对风电接入系统的适应性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5485-5492.
WANG Chenqing, SONG Guobing, LIU Kai, et al. Adaptability analysis of fault component protection of power systems with wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5485-5492.
- [23] 刘洪金, 杨炳元, 梁佳宇, 等. 基于突变量阻抗波形相关性的送出线路纵联保护研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(6): 803-810.
LIU Hongjin, YANG Bingyuan, LIANG Jiayu, et al. Research on pilot protection of outgoing transmission line based on correlation of variable impedance waveform[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(6): 803-810.
- [24] 王晨清, 宋国兵, 汤海雁, 等. 选相及方向元件在风电接入系统中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 89-95.
WANG Chenqing, SONG Guobing, TANG Haiyan, et al. Adaptability analysis of phase selectors and directional relays in power systems integrated with wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 89-95.
- [25] 翟羽佳. 风电场集电线路单相接地短路故障定位方法的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2020.
ZHAI Yujia. Research on single-phase grounding short-circuit fault location method for wind farm collector line[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2020.
- [26] 黄涛, 陆于平, 凌启程, 等. 适用于双馈风电场的改进故障序分量选相方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 123-128.
HUANG Tao, LU Yuping, LING Qicheng, et al. Improved fault-sequence component phase selector applied to DFIG-based wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 123-128.

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2022-12-29

作者简介:

牛伟民(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: nwmxju@126.com

樊艳芳(1971—), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: fyf3985@xju.edu.cn

(编辑 魏小丽)