基于故障行波相似度的风电送出线路保护研究

陈晨[1],董平先[1],宋晓帆[1],郭放[1],齐桓若[1],杜晓通[2]
(1.国网河南省电力公司经济技术研究院,河南 郑州 450000;
2.北京交通大学 电气工程学院,北京 100044)

摘要:分布式风电场站并入配电网后,由于其短路电流幅值受控、频率偏移等特点,传统配电网三段式电流保护难以准确判别风电送出线路故障。提出一种基于故障电流行波相似度的配电网风电送出线路快速保护方法,以快速可靠保证配网的稳定安全运行。首先分析了送出线路两端电源故障电流输出差异,利用故障初始阶段电流行波波形差异性提出相似度纵联保护方法,小波模极大值用于启动保护,通过改进的最长公共子序列算法度量两端波形相似度完成故障判别。最后仿真结果表明了所提方法优越的快速性和可靠性。

关键词:故障行波;波形相似度;送出线路;双馈式风力发电机
中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd24747

Research on Wind Power Transmission Line Protection Based on Fault Traveling Wave Similarity

CHEN Chen[1],DONG Pingxian[1],SONG Xiaofan[1],GUO Fang[1],QI Huanruo[1],DU Xiaotong[2]
(1.*Henan Power Grid Economic Research Institute*,*Zhengzhou* 450000,*Henan*,*China*;
2.*School of Electric Engineering*,*Beiijng Jiaotong University*,*Beijing* 100044,*China*)

Abstract: After the distributed wind farm stations are integrated into the distribution network, due to the characteristics of wind farm short-circuit current amplitude control and frequency offset, the traditional three-stage current protection of distribution network is difficult to accurately identify the fault on the wind power transmission line. Based on the similarity of fault current traveling waves, a fast protection method for wind power transmission lines in distribution networks was proposed to ensure fast and safe operation of distribution networks. First, the differences in the supply fault currents at the two ends of the transmission line were analyzed. A similarity pilot protection approach was proposed by exploiting the difference in the current travelling waveforms during the initial phase of the fault. The wavelet mode maximum was used for the start of protection. With the improved longest common subsequence algorithm, the waveform similarity at both ends was measured for fault discrimination. Finally, the simulation results demonstrate the excellent speed and reliability of the proposed method.

Key words: fault traveling wave; waveform similarity; output transmission line; doubly fed induction generator (DFIG)

大量并网风电机组带来新的发展机遇,同时也增加了运行维护等方面的挑战[1]。尤其是配电网系统,配电网运行功率较小,电网韧性较低,风电等新能源机组受控特性带来的区别于同步机特性的运行特征等严重影响了配网运行的安全可靠性,故障诊断方面原有配网三段式电流保护配置难以适用于风电接入线路保护[2]。因此有必要研究风电接入配网系统线路的快速可靠保护方法。

双馈式风力发电机(doubly fed induction generator,DFIG)是当前配电网风电的主要机型,本文对此类机组进行研究。为研究风电接入配网线路保护方法,首先需明确风电侧故障期间电气量输出特征。针对此问题,文献[3]以三相故障为例,考虑电机控制及撬棒保护作用,分析得到双馈机组故障电流波形随故障距离变化波动较大,该文献研究具有初步性,仅以仿真波形观察波形特征,未有理论推导支撑。考虑到双馈风力发电

基金项目:国网河南省电力公司经济技术研究院基金项目(SGHAYJ00SJJS2200073)
作者简介:陈晨(1984—),女,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为电力系统及其自动化,Email:56990512@qq.com
通讯作者:杜晓通(1997—),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制,Email:xautdxt@126.com

机定、转子接入电网方式不同，转子侧配置撬棒电路保护变流器，撬棒电路是否投入要根据外部电压跌落程度进行判断，外部电压跌落程度低，转子侧为励磁控制，外部电压跌落程度高，则投入撬棒保护[4]。因此，应该分情况讨论双馈风机侧故障期间的电流特征，文献[5]分析了撬棒电流是否投入下的双馈风力电机的短路电流，指出其短路电流特性与定子磁链有关，但仅做了定性分析，未对故障电流计算做出定量分析。在此基础上，文献[6]通过对故障等效网络建立短路电流计算模型，定量分析了不对称故障和对称故障下风电侧输出短路电流。以上故障电流分析均未考虑撬棒投入时间，文献[7]计及撬棒保护投入时间，对风电侧故障暂态过程进行分段研究，分别推导了故障不同阶段的电流表达式，明确了故障期间故障侧输出电流的形态特征。

上述双馈风机故障电流研究揭示了故障期间风电侧的电流输出特征明显区别于传统配电网故障电流输出特征，输出电流的变化及偏移特性严重影响了配电网传统三段式过流保护动作性能[8]。事实上，风电侧故障电流给配网保护带来的主要问题是需要方向性判别，因此有学者提出直接引入纵联差动保护来完成故障判别，但由于风电侧受控特性致使传统纵联保护适应性不足[9]。为此，考虑到风电侧带来的频率偏移和衰减特性，可利用线路两端频率差别及衰减程度完成故障判别，但此类方法都是通过Prony算法提取特征，计算较为复杂且动作速度较慢[10-11]。文献[12]考虑区内区外故障时的时域模型差异，构建电容模型准确识别故障，但适用条件较为理想，未考虑撬棒动作前后的保护效果。也有文献利用短路电流中的稳态分量构建保护，提出自适应的方向电流保护，但要躲避故障暂态瞬间，需考虑提取稳态分量的准确性，动作速度慢，适用于后备保护[13]。故障期间，风电侧和系统侧输出的短路电流波形本身的差异性也被用于线路保护，文献[14]提出利用暂态期间的线路两端的波形相似度来构建保护策略，并利用皮尔逊相关系数度量相似度，保护方法简单，能快速可靠识别故障，但未对故障暂态阶段进行保护原理细致分析，且皮尔逊方法存在抗数据同步、抗噪性不强的缺点，在较强噪声及干扰情况下容易误动作。

本文在文献[14]基础上继承其简单可靠的特点，利用行波理论分析故障暂态电流传播过程，借助小波模极大值启动保护，提出基于两端线模行波相似度的快速纵联保护方法，并通过改进的最长公共子序列（longest common subsequences，LCSS）方法度量相似度以提升相似度保护方法的抗噪性，仿真结果表明了所提方法的正确性及优良性能。

1　同步机与DFIG的故障输出电流特性

图1为典型的分布式风电接入10 kV配网的示意图。

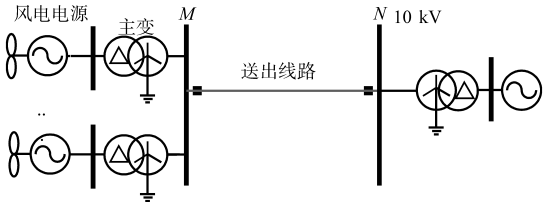

图1　分布式风电接入10 kV配网示意图

Fig.1　Diagram of wind power connection to 10 kV distribution network

由图1可知，配网中风电送出线路两端分别表现为不同的电源输出特性，系统侧呈现为控制较少、故障特征较为明显的同步机电源特性；场站侧则呈现控制较为复杂、故障电流受限的分布式电源特性。为对故障后含分布式风电的配网线路保护做更合理的设计，本节首先对所研究线路两侧的电源故障电流输出特性做简要分析。

1.1　同步机电源故障电流输出特性

同步机电源在故障分析中可看作无穷大电源，由于配网节点间线路较短，且多为架空线路，电容效应不明显，所以配网同步机电源放电回路为简单的一阶回路。以单相电流为例，故障后短路电流输出形式如下式：

$$i_a = I_m \sin(\omega t + \theta - \varphi) + [I_{m|0|} \sin(\theta - \varphi_{|0|}) - I_m \sin(\theta - \varphi)] e^{-t/T_a} \tag{1}$$

式中：I_m为交流电源输出幅值；φ为故障相位角；θ为交流电源初相角；ω为工频电角速度；T_a为直流分量衰减时间常数；$\varphi_{|0|}$为故障初始角。

由式（1）可知，同步机输出故障暂态电流由稳态分量及衰减分量组成，一般地，由于配网线路较短，配网同步机电源侧的暂态过程非常短暂，衰减分量一般在几个ms内可视为衰减至0，其具体的暂态过程时间与线路的长度等线路参数有关，波形特征表现为随时间衰减的工频正弦波。而故障稳态的短路电流只含有稳态分量，信

号较为平稳，适合利用傅里叶算法的工频量算法提取信号，该阶段波形特征表现为平稳的工频正弦波。

1.2　DFIG故障电流输出特性

为保护DFIG转子侧换流器，防止故障电压严重跌落时转子侧产生的大电流损坏变流器，DFIG会配备专门的Crowbar电路，即撬棒电路，保护转子侧换流器。而当故障电压跌落程度较低，转子侧电流低于设定值时，风电侧则利用励磁控制策略来完成故障穿越。因此，DFIG侧故障输出电流随外界故障条件变化影响呈现不同变化，应当分阶段、分情况讨论，即应讨论撬棒电路投入与否情况下风电侧的故障输出电流，及故障发生后撬棒电路延时投入期间与撬棒投入后不同阶段的故障输出电流。首先分析故障电压跌落程度较低、励磁控制下、撬棒未投入情况的DFIG故障电流输出特性。

1.2.1　励磁控制下撬棒电路不投入

励磁控制下，转子侧电压与电流关系为

$$u_{\mathrm{r}} = k_{\mathrm{p}}(i_{\mathrm{r.ref}} - i_{\mathrm{r}}) + k_{\mathrm{i}}\int(i_{\mathrm{r.ref}} - i_{\mathrm{r}})\mathrm{d}t + \mathrm{j}\omega_{\mathrm{s}}\frac{M}{L_{\mathrm{s}}}i_{\mathrm{r}} \tag{2}$$

式中：u_{r}，i_{r}分别为转子归算到电机定子侧后等效转子电压和电流；ω_{s}为定子的电角速度；k_{p}，k_{i}分别为PI控制环节的比例常数和积分常数；L_{s}为定子漏感和励磁电感之和；M为定、转子耦合电感；$i_{\mathrm{r.ref}}$为转子电流的参考值。

此时可以得到同步旋转坐标系下的定子电流为

$$i_{\mathrm{s}} = (A_1 + A_2 + A_3)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_1 t} + A_4\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_1 t}\mathrm{e}^{-k_1 t} + A_5\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_1 t}\mathrm{e}^{-k_2 t} + A_6\mathrm{e}^{-\tau_1 t} \tag{3}$$

式中：A_1，A_2，A_3，A_4，A_5，A_6为各分量幅值；k_1，k_2为与励磁控制的PI环节有关的系数；ω_{r}，ω_1分别为转子的电角速度和同步旋转的电角速度。

由式(3)可知，故障下DFIG电流输出中含有多种衰减分量和稳态交流分量，衰减分量中又包括直流衰减分量和受控制器参数影响的工频暂态分量。励磁控制情况下，控制器参数表现出波动性，会随外界故障条件及参数发生改变，因此输出的故障电流中的工频暂态分量大小等会发生变化，总体故障电流输出的幅值和相角也将不确定。傅里叶算法等平稳信号处理手段无法准确识别此时暂态电流相位和幅值的大小变化，依赖于傅里叶算法的保护方法应用于该情况下的线路故障识别可靠性较低。

在此阶段，DFIG输出的总体暂态故障电流特征表现为变化不确定的衰减波形，故障电流衰减完成后，故障稳态阶段输出电流则表现为幅值较低的交流稳态曲线。

1.2.2　故障后投入撬棒电路

很多学者在研究DFIG故障特性时忽略了撬棒投入时间，设定为故障后立即投入撬棒电路。事实上，撬棒的投入时间与DFIG的工作条件和并网系统有关，但考虑电压跌落的严重程度，为保护变流器撬棒需要快速投入，该时间一般为ms级。本文为研究不同故障阶段的DFIG输出电流特性，借鉴文献[7]中对DFIG故障后暂态电流输出阶段的划分，将故障后的DFIG故障电流输出分为3个阶段：故障发生至并网点电压跌落，撬棒还未投入；撬棒延时投入，转子换流器闭锁；故障电压恢复阶段。

对故障一阶段，用行波可解释为风电送出线路上f处发生故障，故障点向两边发出故障行波，由于波阻抗不连续，在并网母线和系统交流侧发生折反射，引起并网母线电压和交流母线电压跌落。假定该交流线路长度为l，行波波速为v，则在并网母线处感受到电压跌落的最长时间为l/v。此时DFIG控制侧收到电压跌落信号，检测到电压跌落程度大于设定值ΔU_{set}，则延时Δt时间投入撬棒电路。因此故障后$t_{\mathrm{c}}=l/v+\Delta t$时间内，交流送出线路虽发生故障，但还未投入撬棒电路，此时的故障电流输出特征较为明显，电压跌落前、后定子电压为

$$u_{\mathrm{s}} = \begin{cases} u_{\mathrm{s}} & t \leqslant t_0 \\ ku_{\mathrm{s}} & t > t_0 \end{cases} \tag{4}$$

式中：t_0为故障行波传播至并网点的时间。

其中，k反映了电压跌落程度。

故障二阶段撬棒电路投入，此时转子侧变流器闭锁，转子侧变流器出口电压变为0，同时转子侧电阻变为R_{t}，$R_{\mathrm{t}} = R_{\mathrm{r}} + R_{\mathrm{c}}$，其中$R_{\mathrm{c}}$为撬棒电阻。此时，故障二阶段转子磁链的初始值为故障一阶段的末状态值，转子磁链方程为[9]

$$\begin{aligned}\Psi = {} & k_{\mathrm{m}}R_{\mathrm{t}}kU_{\mathrm{s}}/[\mathrm{j}\omega_1(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{s1}} + 1/T_{\mathrm{r}})] + \\ & k_{\mathrm{m}}R_{\mathrm{t}}(1-k)U_{\mathrm{s}}/[\mathrm{j}\omega_1(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{s1}} + 1/T_{\mathrm{r}} - 1/T_{\mathrm{s}})]\cdot \\ & \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_1 t}\mathrm{e}^{-t/T_{\mathrm{s}}} + C\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_{\mathrm{s1}} t}\mathrm{e}^{-(t-t_{\mathrm{c}})/T_{\mathrm{r}}}\end{aligned} \tag{5}$$

其中

$$k_{\mathrm{m}} = L_{\mathrm{m}}/L_{\sigma}$$

$$L_\sigma = L_s L_r - L_m^2$$

$$T_r = L_\sigma / L_s R_t$$

式中：U_s为定子电压；ω_{sl}为转差角速度；L_m为定、转子间互感；L_s，L_r分别为定、转子电感；T_s，T_r分别为定、转子磁链衰减时间常数；C为常数系数；t_c为撬棒投入时间。

根据式(5)可求得故障后的DFIG定子电流形式为

$$i = A\mathrm{e}^{-\tau_1 t} + B\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_1 t} - D\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_1 t}\mathrm{e}^{-(t-t_c)/T_r} \tag{6}$$

式中：A，B，D为不同分量的幅值；τ_1为直流分量衰减常数。

可看出故障二阶段双馈风电的故障电流由衰减直流电流、正弦交流电流、衰减交流电流共同组成，电流组成成分较多。

故障三阶段分析过程类似故障二阶段，不再赘述。

综合故障后3个阶段的故障电流特征，得到故障后DFIG的3个故障暂态阶段电流表达形式如下式：

$$\begin{cases} i_1 = A_1\mathrm{e}^{-\tau_1 t} + B_1\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_1 t} - D_1\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_1 t}\mathrm{e}^{-t/T_r} & t < t_c \\ i_2 = A_2\mathrm{e}^{-\tau_1 t} + B_2\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_1 t} - D_2\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_1 t}\mathrm{e}^{-(t-t_c)/T_r'} & t_c < t < t_1 \\ i_3 = A_3\mathrm{e}^{-\tau_1 t} + B_3\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_1 t} - D_3\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_1 t}\mathrm{e}^{-(t-t_1)/T_r'} & t_1 < t \end{cases} \tag{7}$$

由式(7)可知，在撬棒投入情况下，DFIG故障电流输出表达形式基本一致，故障电流都由衰减的直流分量、稳态交流分量及交流的衰减暂态分量组成，即在故障后不同阶段，电流的相位和幅值大小不断发生变化，但其波形总体呈现衰减趋势。图2展示了单相故障情况下，DFIG侧输出故障电流与系统侧同步机故障电流波形。

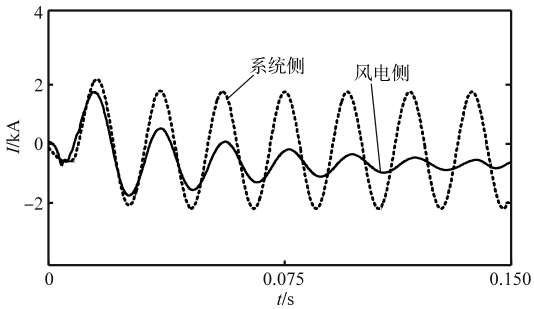

图2　风电送出线路两端故障相电流

Fig.2　Fault phase currents at both ends of the wind power transmission line

由图2可知，故障电流波形基本遵循理论推导规律，DFIG故障电流输出特性明显区别于同步机电源特性，其故障电流频率偏离工频[10]，因此依靠幅值和相位判别故障的保护方法适应性不足，需要提出适用于不同阶段和不同情况的DFIG送出线路保护策略。

2　故障行波相似度保护方法

当图1线路MN上发生区内故障，M侧保护元件检测的电流来自风电侧，N侧则是系统侧电流。由式(3)、式(7)对比式(1)可注意到，故障两侧保护元件感受到的电流表达形式有较大差别，表现出低相似度。而当故障发生在M端外侧时，线路两端保护元件检测到的故障电流皆由系统侧同步机电源提供，两端电流波形呈现高相似度。因此可利用线路两端的波形相似度差异来构造纵联保护方法。

2.1　利用行波模量的快速纵联保护方法

对于长度较长、要求保护速度较快的线路，可以利用行波模量完成纵联相似度保护，而配网架空线路长度一般在50 km以内，因此若用高速的行波相似度方法则需要较高采样率。行波纵联相似度保护优势在于动作速度快、受两端控制影响较少，若将动作时间设置为$(0, t_c)$之间，则保护能够在故障后第一阶段完成故障识别，在此阶段无需考虑撬棒电路是否投入，能够快速根据故障特征完成保护。考虑到对称故障期间不存在零模行波量，本文选用线模行波构建保护。如图3所示，区外发生故障f_5时，故障行波穿越边界M进入送出线路，M端前行波在线路MN上经过衰减变为N端反行波。即在时间$(t_0, t_0+l/v)$内(t_0为行波在M端折反射的时刻)N端反行波为M端前行波衰减后的行波，所以N端反行波的幅值要低于M端前行波，但波形相似程度高。同样的，当线路MN上发生故障，线路两端保护装置检测到的行波模量是由故障点初始行波沿不同传播方向衰减得到，N端反行波的幅值与M端前行波幅值大小要根据故障发生位置确定，波形相似程度低。

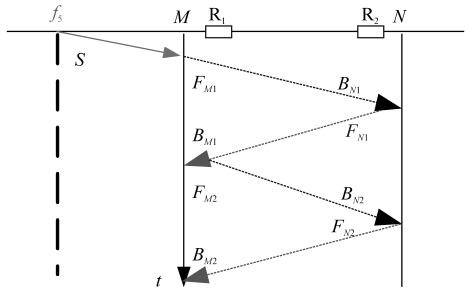

图3　区外故障时的故障行波传播网格图

Fig.3　Grid diagram of fault traveling wave propagation in case of external fault

在1.2.2节提到的故障第一阶段，故障阶段时间较短，一般在几个ms以内，常规的暂态保护方法无法在如此短时间内完成可靠的故障判别，要借助较高频的暂态方法或者行波方法来判别故障，本文利用N端反行波与M端前行波的相似度来判别故障，故障判别时间小于t_c。对于保护要求较高的线路后备保护，则可利用提取稳态分量的方法来完成故障判别，区内故障时，两端的故障电流稳态分量有着明显差异，因此可利用文献[13]中提出的自适应方向电流保护来完成判别，也可通过站内通信完成故障判别。对配网风电送出并网线路自适应调整保护定值，当线路发生故障，风电端检测到故障电压跌落，则向主站发出信号调整靠近风电侧并网点保护侧电流设定定值，根据电压跌落程度自适应调整外部设定定值，从原来的三段式定值保护调整为自适应保护阈值，鉴于篇幅，另文讨论具体细节，此处不再赘述。

图4展示了区内、区外故障时M端前行波与N端反行波的典型波形特征。

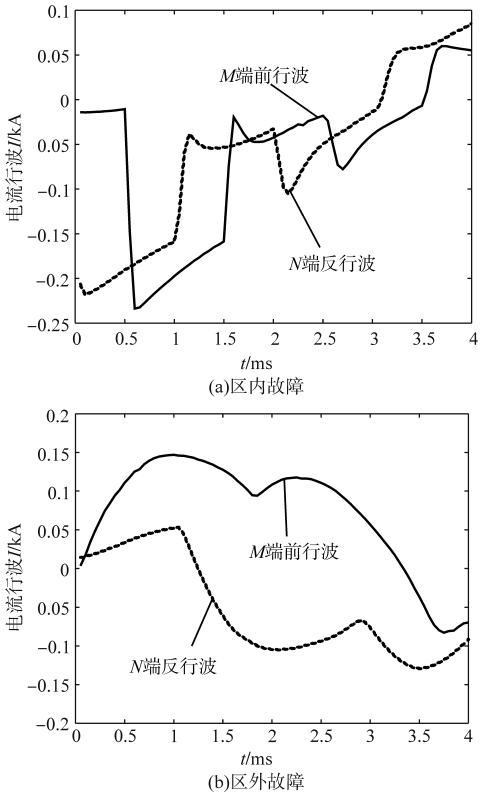

图4　M端前行波与N端反行波

Fig.4　M-terminal forward wave and N-terminal backward wave

设定线路电路正方向为母线指向线路，区外故障行波电流在理想幅值不衰减情况下，两端前、反波形呈现完全相反趋势，表现出很低的相似度，而区内故障由于故障点距离两端母线距离不同，呈现延时效应，幅值差距不明显，因此适用于距离类相似度方法求解相似度。鉴于线路中行波的传播过程，区外故障时，两端行波存在明显的延时效应，需要依靠对时方法或者两端启动保护来缓解数据不同步带来的误差，否则会影响保护输出。皮尔逊等相似度方法易受噪声和同步性影响，方法本身存在缺陷性，因此，本文利用双端启动判据，利用抗噪性能强的最长公共子序列方法同时缓解数据不同步及噪声带来的误差，具体实施后续展示。

2.2　启动元件

为适应故障快速判断方法，本文提出检测小波模极大值的保护启动方法，小波分析方法是局部分析方法，对于曲线的局部突变点敏感。故障发生对于正常运行状态也是一个突变状态，因此对应于小波模值表现为一个尖峰值，可通过检测该极大值来启动保护。当该模极大值大于设定阈值R_{set}则启动故障，反之则判定为扰动，该设定阈值根据配网最大负荷切换时的整定值确定。选用Meyer小波提取出高频细节系数，对半子带滤波后的4层细节分解后，可清晰得到高频信息的表达。此时再对细节系数进行重构，得到与采样点数相等的细节系数点。

2.3　相似度度量方法

考虑两端数据的不同步性和波形畸变引起的误差，本文利用改进的最长公共子序列算法来度量两组时序数集的相似性。改进的最长公共子序列算法利用自适应的阈值σ来剔除较为明显的离群值点，通过全局匹配来寻找匹配点。此方法区别于Hausdorff距离算法，不受离群值影响，受单个值大小影响较小；也区别于皮尔逊算法，该算法可以适用于不同长度的时序数组相似度计算，抗噪能力更强。

两个时域波形样本的最长公共子序列长度$L(m,n)$可由下式计算：

$$L(m,n)=\begin{cases}\max\{L(m-1,n),L(m,n-1)\} & m,n>0,d(m,n)>\sigma\\ L(m-1,n-1)+1 & m,n>0,d(m,n)<\sigma\\ 0 & \text{其他}\end{cases}\tag{8}$$

式中：m，n分别为两个样本所含的元素数目；$d(m,n)$为两个样本点间的欧氏距离。

定义最长公共子序列相似度为

$$P_{mn}=\frac{L(m,n)}{\min(m,n)}\tag{9}$$

可见，计算得到的最长公共子序列数值越大，两个比对波形序列的相似性越高。

2.4 保护流程

本文所提保护流程如下：

1）启动元件发出信号，线路两端保护设备分别收集4 ms时间窗内的三相故障电流。

2）利用相模变换公式解耦求解线模行波分量。

3）利用式（8）、式（9）计算两端线模量首次前行波和反行波相似度，如N端反行波和M端前行波，因为规定线路电流正方向为母线指向线路，所以穿越性质的区外故障电流相似度计算结果要小于设定值P_{set}，而区内故障则大于设定值P_{set}。区内故障，保护动作；区外故障，保护不动作。

4）为保证可靠性，故障后第三阶段或稳态阶段可利用自适应方向保护或者自适应三段式过流保护充当后备保护。

对于步骤2）中相似度定值，可做如下讨论：区外故障时，两端行波线模量电流方向不同，因此呈现反向趋势，本文设定相似度内设阈值σ为自适应值，为两组数据中较小平均值的绝对值，因此考虑行波电流交集过程采样点约占总采样点的20%，求得的相似度值为0.2，考虑噪声干扰等因素设置可靠系数为1.2~1.5，因此本文设置相似度阈值为P_{set}=0.3。

3 仿真分析

在PSCAD/EMTDC中搭建如图5所示配网模型，配网电压等级为10 kV，风电侧选用20台1.5 MW风机模拟风场送出，为考虑一般性，送出线路是长度为50 km的架空线路，采样频率设置为10 kHz，故障发生在仿真开始后1 s时刻，持续时间为1 s。具体线路参数参照文献[10]设置。为验证所提保护方法在不同故障条件和噪声下可靠快速动作，下面进行不同故障情况下的讨论。

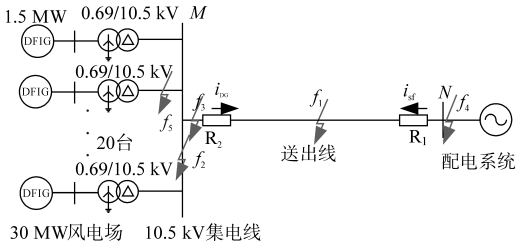

图5 分布式风电送出配网示意图

Fig.5 Diagram of distributed wind power integration into the distribution network

3.1 故障电阻

对区内故障f_1，设定故障类型为A相接地故障，设置故障电阻从0~500 Ω范围内每次增加50 Ω验证保护动作正确性；对区外故障f_5，设置同样故障条件。相似度计算值变化如图6所示。

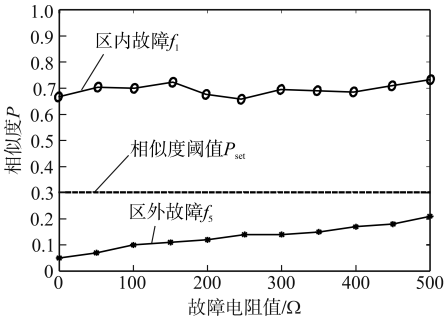

图6 不同故障阻值下的相似度结果

Fig.6 Similarity results for different fault resistance

由图6可知，随着故障电阻增加，故障行波幅值降低，区内故障相似度值会上升，远高于设定阈值0.3，而区外故障相似度也会上升，但仍低于设定阈值。当故障电阻为500 Ω时，区内故障最长公共子序列相似度为0.72，而区外故障仅为0.22，相似度值有较大的差距，因此所提保护能够在500 Ω过渡电阻下可靠运行。

3.2 故障距离

对区内故障f_1，设定故障类型为A相接地故障，设置故障距离从0~50 km间每次增加5 km验证保护动作正确性，相似度计算值变化如图7所示。对不同区外故障位置的故障电流进行相似度计算，结果如表1所示。

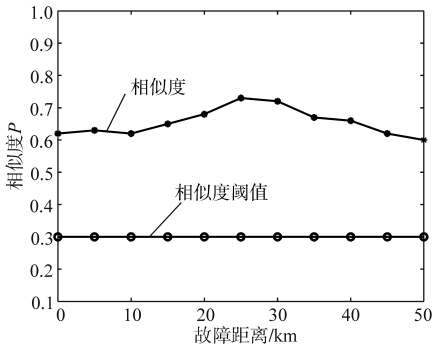

图7 不同故障距离下的相似度结果

Fig.7 Similarity results at different fault distances

由图7可知，故障距离变化会引起相似度计算结果波动，但区内故障时的相似度计算值始终远高于设定阈值，因此故障距离变化不会干扰所提保护方案动作性能。

由表1中数据可知，区外故障相似度计算中始终低于设定阈值0.3，加入20 dB噪声会引起相

表1　区外故障判别结果

Tab.1　External fault discrimination results

故障位置	LCSS相似度		判别结果
	20 dB噪声	无噪声	
f_2	0.18	0.09	区外故障
f_3	0.08	0.03	区外故障
f_4	0.21	0.09	区外故障
f_5	0.09	0.06	区外故障

似度计算值增大，但仍小于设定阈值，因此区外故障不会引起所提保护误动作，保护性能良好。

3.3　故障类型

对区内故障的金属性故障f_1，设置故障距离为25 km，对区外故障f_5，设置不同故障类型，不同故障类型下的保护结果如表2所示。

由表2数据可知，所提方法计算得到的不同故障类型下的相似度约为0.7，远大于设定阈值0.3，有较大裕度空间。加入20 dB噪声后相似度虽然降低，但仍高于设定阈值，因此故障类型不会影响本文所提方法性能，保护能够正确动作。

表2　不同故障类型下的相似度判别结果

Tab.2　Discrimination results of similarity under different fault types

故障类型	过渡电阻/Ω	LCSS相似度		判别结果
		无噪声	20 dB噪声	
单相接地	0	0.72	0.63	区内故障
	500	0.75	0.61	区内故障
两相接地	0	0.74	0.62	区内故障
	500	0.77	0.61	区内故障
两相短路	0	0.71	0.63	区内故障
	500	0.78	0.60	区内故障
三相故障	0	0.70	0.63	区内故障
	500	0.75	0.63	区内故障

3.4　噪声干扰

为测试所提保护方法的抗噪声能力，在原始波形数据中依次加入信噪比（sigral to noise ratio，SNR）为10~50 dB、间隔为5 dB的高斯白噪声。区外故障时，本文设置的相似度阈值可变化范围较小，噪声加入后，会增加保护误动作的风险。此处以区外的金属性故障为例，检验所提保护的抗噪声能力。设置故障为MN线路的相邻线路故障，图8展示了区外故障时不同噪声下的相似度。

由图8可知，随着噪声强度的增加，区外故障的相似度计算结果也快速增加，当信噪比强度为10 dB时，相似度计算值为0.27，接近设定的相似度阈值，保护仍能正确运行。事实上，实际现场运行中信噪比强度一般大于20 dB，在这种信噪比强度下，所提策略的保护性能不会受到影响，能够准确快速可靠动作。

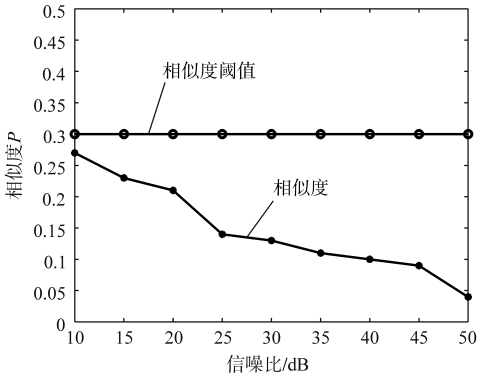

图8　区外故障时不同噪声下的相似度结果

Fig.8　Similarity results with different noise during external faults

4　结论

本文考虑故障期间撬棒保护投入时间将故障过程分为3个阶段，在故障第一阶段提出一种不受风电运行方式和控制影响的故障行波相似度保护方法，得到如下结论：

1）受风电侧控制影响，故障期间风电侧故障电流输出特性明显区别于同步机电源特性，风机侧输出故障电流中含有明显的直流衰减分量和工频暂态分量。

2）故障后，转子侧撬棒保护延时投入，利用故障后到撬棒保护投入时刻的该阶段故障特征构造故障行波相似度保护方法，不受风电侧控制转换影响。

3）所提保护时间窗长仅为4 ms，故障后能够快速动作；仿真验证了改进的最长公共子序列相似度方法抗噪性好，保护能够在10 dB噪声下准确动作，能够在500 Ω故障电阻下可靠动作。但由于采用行波方法，需要的采样率较高。

参考文献

[1]　CHANG P，SONG G，HOU J，et al. A single-ended fault location method for grid-connected converter system based on control and protection coordination[J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2021，37（4）：3071-3081.

[2]　张保会，李光辉，王进，等. 风电接入电力系统故障电流的影响因素分析及对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备，2012，32（2）：1-8.
ZHANG Baohui，LI Guanghui，WANG Jin，et al. Affecting factors of grid-connected wind power on fault current and impact on protection relay[J]. Electric Power Automation Equipment，2012，32（2）：1-8.

[3]　撖奥洋，张哲，尹项根. 双馈风力发电机故障电流特性的仿真研究[J]. 华中科技大学学报（自然科学版），2009，37（9）：

105-108.
HAN Aoyang, ZHANG Zhe, YIN Xianggen. The simulation research on the characteristic of fault current of doubly-fed induction generator[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2009, 37(9): 105-108.

[4] 赵宏博,汤海雁,张文亮,等. 双馈风电机组零电压穿越暂态特性分析及综合控制策略[J]. 电网技术,2016,40(5):1422-1430.
ZHAO Hongbo, TANG Haiyan, ZHANG Wenliang, et al. Transient characteristics research and integrated control strategy of DFIG for zero voltage ride through[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1422-1430.

[5] 毕天姝,刘素梅,薛安成,等. 具有低电压穿越能力的双馈风电机组故障暂态特性分析[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(2):26-31.
BI Tianshu, LIU Sumei, XUE Ancheng, et al. Fault analysis of doubly fed induction generator wind turbines with low-voltage ride-through capability[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 26-31.

[6] 肖繁,张哲,尹项根,等. 含双馈风电机组的电力系统故障计算方法研究[J]. 电工技术学报,2016,31(1):14-23.
XIAO Fan, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. The fault calculation method of power systems including doubly-fed induction generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 14-23.

[7] 孙丽玲,尹思杰. 计及Crowbar投入时间影响的双馈感应风力发电暂态全过程研究[J]. 电机与控制学报,2020,24(6):9-15.
SUN Liling, YIN Sijie. Research on transient full process of doubly-fed induction generator considering Crowbar protection insertion[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(6): 9-15.

[8] TELUKUNTA V, PRADHAN J, AGRAWAL A, et al. Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: a review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 365-379.

[9] 李彦宾,贾科,毕天姝,等. 电流差动保护在逆变型新能源场站送出线路中的适应性分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):100-105.
LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Adaptability analysis of current differential protection of outgoing transmission line emanating from inverter-interfaced renewable energy power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 100-105.

[10] 段建东,崔帅帅,刘吴骥,等. 基于电流频率差的有源配电网线路保护[J]. 中国电机工程学报,2016,36(11):2927-2934.
DUAN Jiandong, CUI Shuaishuai, LIU Wuji, et al. Line protection based on current frequency difference for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2927-2934.

[11] 段建东,陈童,尚迪,等. 基于电流衰减因子的含DFIG配电线路保护方案[J]. 中国电机工程学报,2020,40(6):1915-1924.
DUAN Jiandong, CHEN Tong, SHANG Di, et al. Current attenuation factor based line protection scheme for distribution network of DFIG wind power integration system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1915-1924.

[12] 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, TANG 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.

[13] 马静,刘静. 基于故障稳态分量的含DG配电网自适应方向电流保护方案[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):1-9.
MA Jing, LIU Jing. Adaptive directional current protection scheme based on steady state component in distribution net work with DG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 1-9.

[14] 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.

收稿日期:2022-11-01
修改稿日期:2022-12-07

(上接第21页)

[14] 王民华,李凤霞. 混合储能平抑微电网功率波动控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(4):215-220.
WANG Minhua, LI Fengxia. Study on control strategy of hybrid energy storage used in stabilization power fluctuation of microgrid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 215-220.

[15] 杨彦杰,陈雨若,唐圣学. 基于神经网络的混合储能系统能量管理策略[J]. 计算机仿真,2020,37(9):88-92.
YANG Yanjie, CHEN Yuruo, TANG Shengxue. Energy management mode of hybrid energy storage system based on neural network algorithm[J]. Computer Simulation, 2020, 37(9): 88-92.

收稿日期:2022-08-03
修改稿日期:2022-10-26