

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201128

适应于双馈风电场送出线的时域距离纵联方向保护

王春又, 孙士云, 毛肖, 赵伟, 李大风, 杨兴雄, 黄柯昊, 岳清

(昆明理工大学, 云南 昆明 650500)

摘要: 针对基于傅里叶算法的距离纵联方向保护应用于双馈风机接入系统会受频偏特性影响这一问题, 分析了双馈风机短路电流特性对传统距离方向元件的影响。考虑到双馈风电场的频偏特性, 运用了一种时域保护原理, 即通过采集双馈风电场送出线两端保护安装处电压、电流时域信息, 利用递推最小二乘法辨识出两端保护装置感受到的电阻、电感, 将时域距离保护 II 段作为方向判别元件实现时域距离纵联方向保护。仿真结果表明, 该方法不受风电场侧短路电流频偏特性的影响, 能准确、快速判断出故障方向, 且具有较强的抗过渡电阻能力, 提高了双馈风电场送出线纵联方向保护的動作可靠性。

关键词: 双馈风机; 送出线; 时域; 纵联方向保护; 频偏特性

Longitudinal direction protection of time domain distance applicable to the outgoing line of a double-fed wind farm

WANG Chunyou, SUN Shiyun, MAO Xiao, ZHAO Wei, LI Dafeng, YANG Xingxiong, HUANG Kehao, YUE Qing
(Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Longitudinal direction protection of distance based on a Fourier algorithm and applied to the access system of a double-fed wind generator is influenced by frequency deviation characteristics. This paper analyzes the influence of short-circuit current characteristics of such a generator on the directional element of conventional distance. Given the frequency deviation characteristics of a double-fed wind farm, it adopts the principle of a time domain protective device. That is, it collects the time domain information of voltage and current at the protective device of each terminal of the outgoing line of a double-fed wind farm, recognizes the resistance and inductance at the protective device of each terminal by means of a recursive least squares method, takes time domain distance protection section II as the element to distinguish direction, so as to realize longitudinal direction protection of time domain distance. The simulation result indicates that this method will not be influenced by frequency deviation characteristics of short-circuit current at the wind power plant, and can identify the fault direction accurately and quickly. It is well able to resist transition resistance and improves the reliability of protection operation of the longitudinal direction of the outgoing line at the double-fed wind farm.

This work is supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 52037003) and Major Special Project of Yunnan Province (No. 202002AF080001).

Key words: double-fed wind generator; outgoing line; time domain; longitudinal direction protection; frequency deviation characteristics

0 引言

近十几年来风电发展迅猛, 电网中风电接入容量不断增大^[1-5]。大规模风电场送出线一般为 110 kV 及以上电压等级输电线路, 采用常规的高压/超高压

输电线路保护配置, 没有考虑风电接入的影响, 这将导致传统继电保护装置可能无法快速、可靠地动作^[6-9]。纵联保护作为风电场送出线的主保护之一, 因受到风电系统故障特征的影响, 其性能将受到影响^[10-11]。因此, 研究适用于风电接入系统的纵联方向保护显得尤为重要。

输电线路的纵联保护利用线路两侧的电气量进行同时比较、联合工作, 以达到快速、可靠切除全

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(52037003); 云南省重大专项资助(202002AF080001)

线路任何点故障的目的^[12-14]。目前, 已有大量学者在双馈风机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)短路电流特性、双馈风电场送出线纵联方向保护适应性方面展开了一定研究, 并取得了一系列研究成果。文献[15]分析了双馈风电场送出线的故障特性, 其故障特性使线路保护方向元件、距离元件的动作特性受到严重影响。文献[16]研究了风电 T 型接入线路故障点、风电场运行方式及过渡电阻对保护测量阻抗的影响, 但其将风电场视为可变电流源, 没有分析风机故障特性对测量阻抗的影响。文献[17]分析了双馈风电短路电流特性中的转速频率分量以及风电场弱馈特性对测量阻抗的影响。文献[18]基于故障线路两侧电流幅值差异提出适用于含分布式电源配电网的新型纵联保护方案。文献[19]为解决包含分布式电源智能配电网中故障方向的检测问题, 提出一种基于电压变化量幅值比较的故障方向检测元件。但以上文献提取工频量算法均采用全周傅里叶算法, 双馈风电场故障特性会导致全周傅里叶算法不能准确提取工频量。为了解决工频量保护面临的问题, 专家学者提出了用时域量构造风电场送出线保护新原理。文献[20]利用输电线路内部和外部故障时系统参数 R 和 L 的符号关系来判断出故障的方向。文献[21]提出一种基于时域模型识别的纵联保护新原理, 根据线路两端差动电压电流在区外故障时符合电容模型、区内故障时不符合电容模型的特点得到了保护判据。文献[22]利用风电场侧与系统侧暂态电流波形在区内外故障时的差异, 提出一种基于余弦相似度的纵联保护原理。

目前专家学者对双馈风电场短路电流特性及其对保护影响的研究较为全面, 但是当前利用时域量构造送出线纵联方向保护的研究成果较少。因此本文首先分析傅里叶算法提取误差及过渡电阻对距离方向元件的影响。基于此, 运用了不受频率影响且具有抗过渡电阻能力的时域距离纵联方向保护方法, 对基于傅里叶算法的距离纵联方向保护和时域距离纵联方向保护在双馈风电场送出线上的适应性进行分析。

1 傅里叶算法提取误差及过渡电阻对距离方向元件的影响

传统距离纵联方向保护是以线路两端的距离保护 II 段作为方向判别元件, 通过比较线路两端测量阻抗与整定阻抗的关系, 来判断区内外故障^[23]。

$$\left| Z_m - \frac{1}{2} Z_{set} \right| \leq \left| \frac{1}{2} Z_{set} \right| \quad (1)$$

式中, Z_m 、 Z_{set} 分别为测量阻抗和整定阻抗。其中, 测量阻抗表达式为^[19]

$$Z_m = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} \quad (2)$$

式(2)中测量电压 \dot{U}_m 和测量电流 \dot{I}_m 均是根据线路瞬时电压、电流经傅里叶算法计算后得到的工频量电压和电流。当双馈风电场送出线发生故障时, 转子侧短路电流过大, 会触发 Crowbar 保护动作, 定子绕组电流中会感应出衰减转速频率分量。由于衰减转速频率分量的存在, 导致离散傅里叶算法(Discrete Fourier Transform, DFT)提取工频分量电流时存在误差量^[24]。风电场侧电压由电网电压支撑, 主要为工频分量, 风电场侧提供的短路电流不再是工频分量。文献[24]分析了计及 Crowbar 保护动作情况下双馈风机短路电流特性, 并解析推导了计及 Crowbar 保护动作时的转速频率分量对全周傅里叶算法产生的计算偏差表达式。受频率偏移特性影响, 风电场送出线保护安装处测量阻抗的误差为^[24]

$$\Delta Z_{c1} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_{c1} + \Delta \dot{I}_c} - \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_{c1}} \quad (3)$$

式中: \dot{I}_{c1} 、 $\Delta \dot{I}_c$ 分别为基频分量、误差分量, 具体表达式见附录 A。

过渡电阻的存在会使保护安装处的测量阻抗发生变化, 因此下面分析过渡电阻对距离方向元件的影响。经过渡电阻接地故障的网络图如图 1 所示。

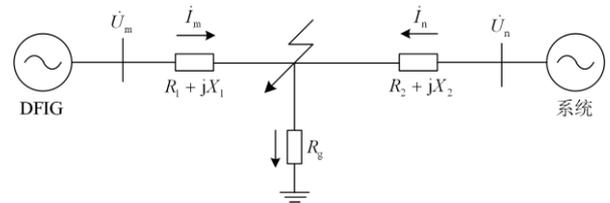


图 1 故障网络图

Fig. 1 Fault network diagram

根据图 1 的故障网络图, 可列写测量电压方程为

$$\dot{U}_m = (R_1 + jX_1)\dot{I}_m + R_g(\dot{I}_m + \dot{I}_n) \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)中, 可得到考虑风电场频偏特性及过渡电阻影响下的风电场送出线保护安装处测量阻抗的误差为

$$\Delta Z_{c2} = R_g + \frac{R_g \dot{I}_n}{\dot{I}_{c1} + \Delta \dot{I}_c} \quad (5)$$

由式(5)可知, 基于工频量的传统距离方向元件受风电场频偏特性及过渡电阻的影响, 存在误差阻

抗 ΔZ_{c2} ，该误差阻抗会造成距离方向元件不能正确动作。

2 时域距离纵联方向保护

由以上分析可知，傅里叶算法提取误差及过渡电阻的存在会导致距离方向元件不能正确动作。基于此，研究了适用于风电接入系统的时域距离纵联方向保护。时域距离纵联方向保护是在时域上构建的保护原理，通过提取保护安装处全量信息，并不涉及信号的频域信息，因此不受风电场侧频率偏移的影响，且所需数据窗较短，其响应时间约为 0.01~0.02 s^[25]。但解微分方程算法受高频分量的影响较大，为此可以考虑将保护安装处测量电压、电流先经过低通滤波，然后再进行计算^[26]。

首先，将输电线路等效为 R-L 线路模型，忽略分布电容的影响。如图 1 所示，当 k 点发生相间经过渡电阻短路故障时，以 M 侧为例，可用方程式(6)表示。

$$u_m(t) = R_1 i_m(t) + L_1 \frac{di_m(t)}{dt} + R_g(i_m(t) + i_n(t)) \quad (6)$$

式中： $u_m(t)$ 、 $i_m(t)$ 分别为风电侧保护安装处的电压、电流时域全量信息； R_1 、 L_1 分别为故障点至保护安装处的电阻和电感值； R_g 为过渡电阻阻值。

其次，对式(6)进行离散化处理，采用差分代替微分形式的方法，离散化处理后的时域方程可表示为

$$u_m(t) = R_1 i_m(t) + L_1 \frac{i_m(t) - i_m(t - \Delta t)}{\Delta t} + R_g(i_m(t) + i_n(t)) \quad (7)$$

当 k 点发生单相经过渡电阻接地故障时，以 M 侧为例，可用方程(8)表示。

$$u_m(t) = R_1(i_m(t) + K_r i_0(t)) + L_1 \frac{d(i_m(t) + K_1 i_0(t))}{dt} + R_g(i_m(t) + i_n(t)) \quad (8)$$

式中： $i_0(t)$ 为零序电流时域全量信息； $i_n(t)$ 为电网侧保护安装处电流时域全量信息； K_r 、 K_1 分别为零序电阻、电感的补偿系数。

对式(8)进行离散化处理，采用差分代替微分形式的方法，离散化处理后的时域方程可表示为

$$u_m(t) = R_1(i_m(t) + K_r i_0(t)) + R_g(i_m(t) + i_n(t)) + L_1 \frac{(i_m(t) + K_1 i_0(t)) - (i_m(t - \Delta t) + K_1 i_0(t - \Delta t))}{\Delta t} \quad (9)$$

式(7)、式(9)中有 R_1 、 L_1 、 R_g 三个未知数，根

据测量电压和测量电流的瞬时值，利用递推最小二乘法对未知量进行参数辨识，即可得到故障点到保护安装处 R_1 、 L_1 的值，从而得到测量阻抗。由于双馈风机转子转速变化范围为 ± 0.3 p.u.，则故障电流的频率将在 35~65 Hz 范围内变化^[15]。利用 Prony 算法对故障电流进行频谱分析，再将故障电流主频率代入 ω_{sm} ，从而得到整定阻抗。整定阻抗 Z_{set} 的表达式为

$$Z_{set} = R_1 + j\omega_{sm} L_1 \quad (10)$$

式中， $\omega_{sm} = 2\pi f_s$ 为定子侧电流主角频率。

通过比较测量阻抗与整定阻抗的关系，对故障区域进行判别，时域距离方向元件动作判据为

$$\left| Z_m - \frac{1}{2} Z_{set} \right| \leq \left| \frac{1}{2} Z_{set} \right| \quad (11)$$

时域距离纵联保护首先将送出线路两侧测量电压和测量电流的瞬时值低通滤波处理后，采用最小二乘法求解得测量阻抗。同时，利用 Prony 算法分别对两侧故障相电流进行频谱分析，将主频率代入式(10)求解得整定阻抗。最后，通过时域距离方向元件动作判据判断出故障方向。当 M 侧与 N 侧两端时域距离保护 II 段均启动时，判定为区内故障，时域距离纵联方向保护动作；反之，则判定为区外故障，保护不动作。以相间经过渡电阻短路故障为例，时域距离纵联方向保护流程图如图 2 所示。

3 仿真验证及保护动作特性分析

为了对比分析传统距离纵联方向保护和时域距离纵联方向保护在风电场送出线的保护动作特性，在 Matlab/Simulink 中搭建了并网双馈风机的电磁暂态仿真模型。风电场结构图如图 3 所示。双馈风电机组额定容量为 1.5 MW，额定电压为 0.69 kV，功率因数为 0.95。风机经箱变(0.69/35 kV)连接在 35 kV 集电线路路上，再经过 35 kV 母线及主变，最后通过 110 kV 风电场送出线将电能供给系统。风电场送出线全长 100 km。单位长度线路参数： $r_1 = 0.1278 \Omega/\text{km}$ ， $r_0 = 0.3834 \Omega/\text{km}$ ， $l_1 = 1.124 \text{ mH}/\text{km}$ ， $l_0 = 3.372 \text{ mH}/\text{km}$ 。

3.1 传统距离纵联方向保护适应性分析

1) 对称故障

在 $t=0.3$ s 时，以风电场送出线分别在 50 km、95 km、105 km 处发生三相金属性短路故障为例，对传统距离纵联方向保护在风电场送出线的适应性分析，传统距离纵联方向保护的的动作特性如图 4—图 6 所示。

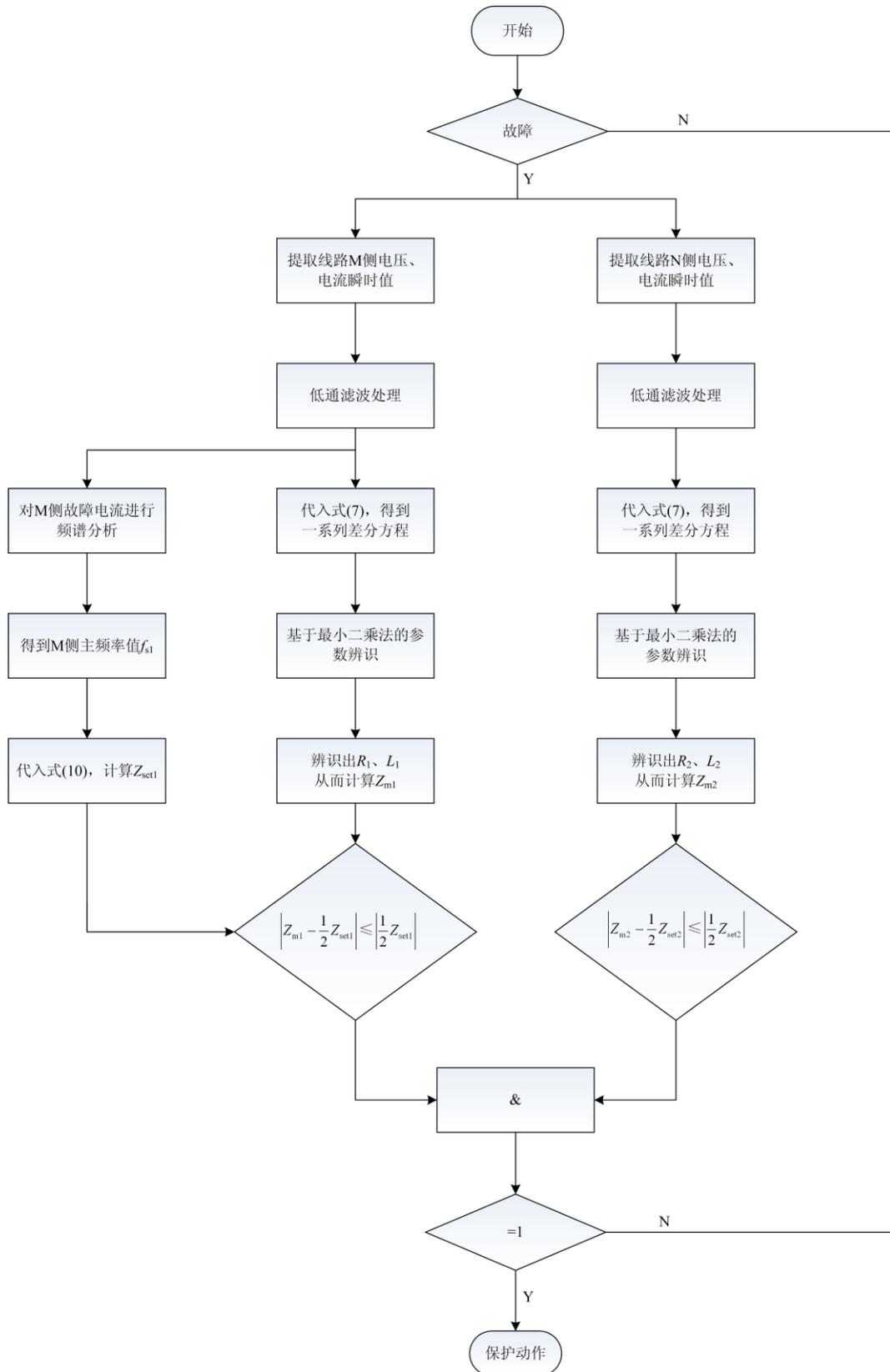


图 2 时域距离纵联方向保护流程图

Fig. 2 Flow chart of longitudinal direction protection of time domain distance

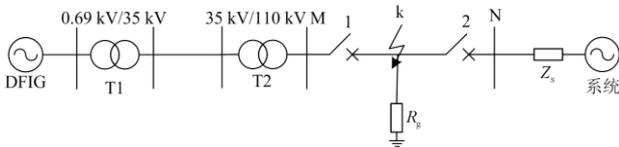
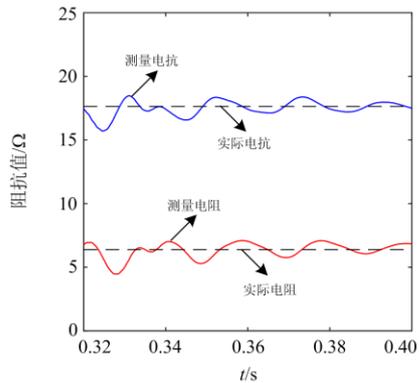
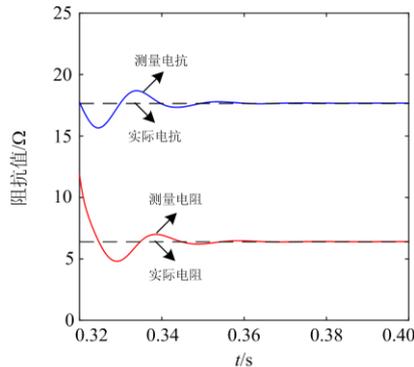


图 3 双馈风电场系统结构图

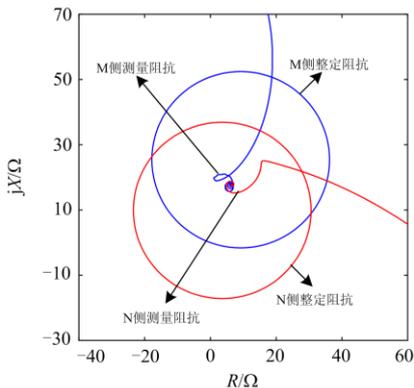
Fig. 3 System structure diagram of doubly-fed wind farm



(a) M侧阻抗值



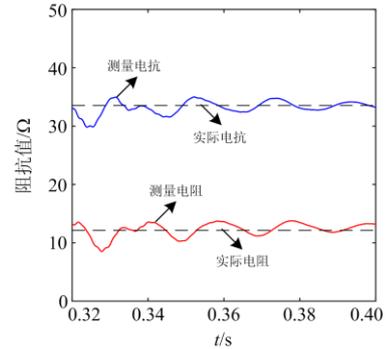
(b) N侧阻抗值



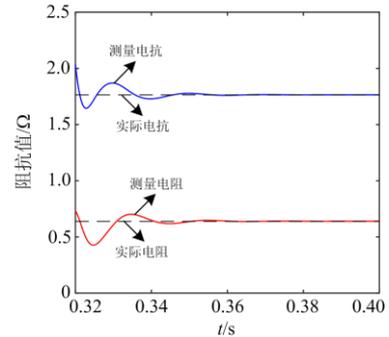
(c) 保护动作结果

图 4 距 M 侧保护安装处 50 km 处故障时传统距离纵联方向保护动作特性

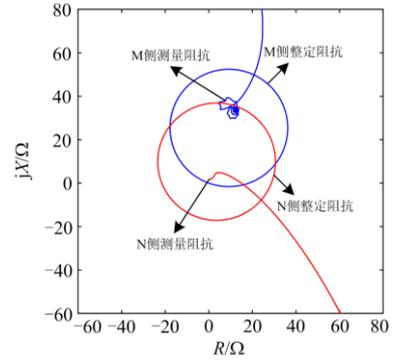
Fig. 4 Characteristics of protective action of longitudinal direction of conventional distance when fault is 50 km from the protective device on M-side



(a) M侧阻抗值



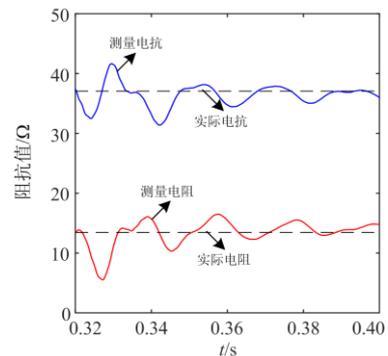
(b) N侧阻抗值



(c) 保护动作结果

图 5 距 M 侧保护安装处 95 km 处故障时传统距离纵联方向保护动作特性

Fig. 5 Characteristics of protective action of longitudinal direction of conventional distance when fault is 95 km from the protective device on M-side



(a) M侧阻抗值

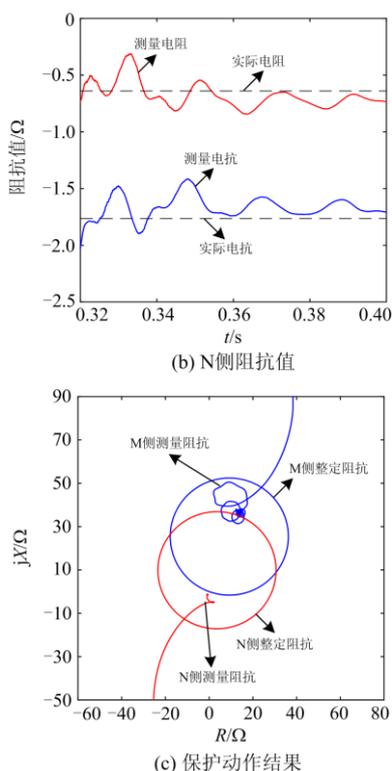


图 6 距 M 侧保护安装处 105 km 处故障时传统距离纵联方向保护动作特性

Fig. 6 Characteristics of protective action of longitudinal direction of conventional distance when fault is 105 km from the protective device on M-side

在距 M 侧保护安装处 50 km 处发生三相金属性短路故障时, 由图 4(a)和图 4(b)可知, 傅里叶算法得到的测量阻抗出现波动现象。但是, 当故障在靠近线路中点发生时对保护影响较小, M 侧与 N 侧的距离方向元件均判断为正方向故障, 由图 4(c)可知, 传统距离纵联方向保护正确动作。在距 M 侧保护安装处 95 km 处发生三相金属性短路故障时, 由图 5(c)可知, M 侧感受到的测量阻抗轨迹反复进出整定阻抗圆。这导致距离方向元件频繁动作和返回, 不能正确判断故障方向, N 侧距离方向元件判断为正方向故障, 因此传统距离纵联方向保护不能正确动作。在距 M 侧保护安装处 105 km 处发生三相金属性短路故障时, 由图 6(c)可知, M 侧感受到的测量阻抗轨迹反复进出整定阻抗圆。这也会导致距离方向元件频繁动作和返回, 不能正确判断故障方向, N 侧距离方向元件判断为反方向故障, 因此传统距离纵联方向保护可能会误动。

2) 不对称故障

在 $t=0.3$ s 时, 以风电场送出线分别在 50 km、

95 km、105 km 处发生 A 相经过渡电阻接地故障为例, 对传统距离纵联方向保护在风电场送出线的适应性分析, 传统距离纵联方向保护的動作特性如图 7—图 9 所示。

由图 7 可知, 在距 M 侧保护安装处 50 km 处发生 A 相经过渡电阻接地故障, 且当过渡电阻分别为 0Ω 、 10Ω 时, M 侧与 N 侧距离方向元件均判断为正方向故障, 传统距离纵联方向保护正确动作。当过渡电阻为 30Ω 时, M 侧与 N 侧距离方向元件均

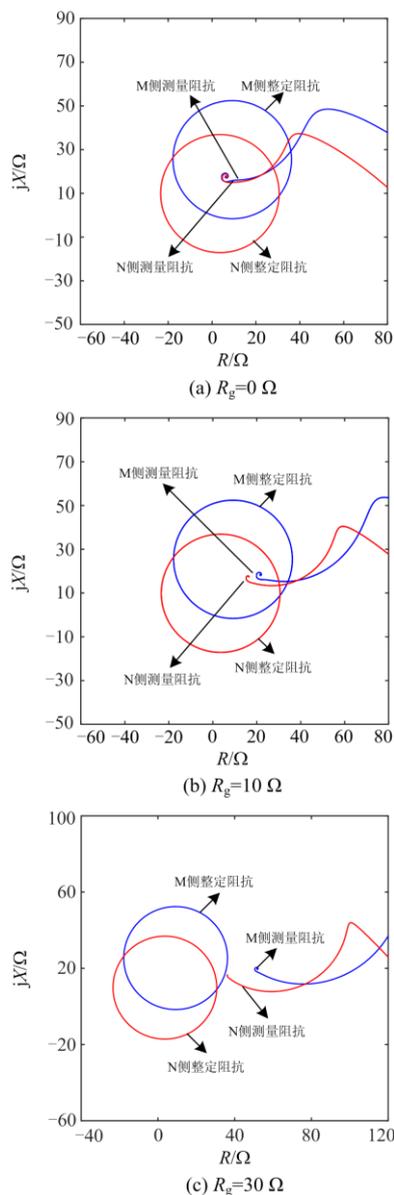
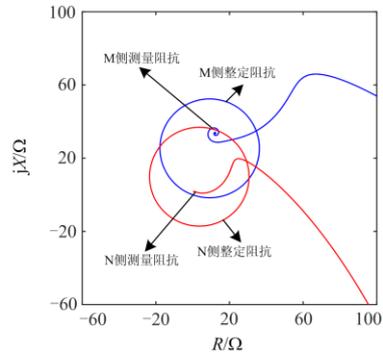
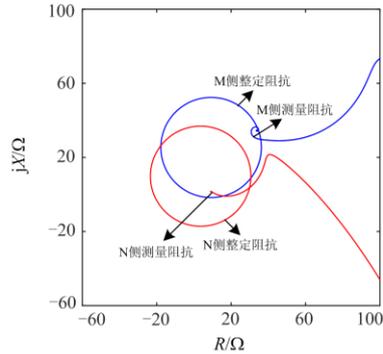


图 7 距 M 侧保护安装处 50 km 处故障时传统距离纵联方向保护动作特性

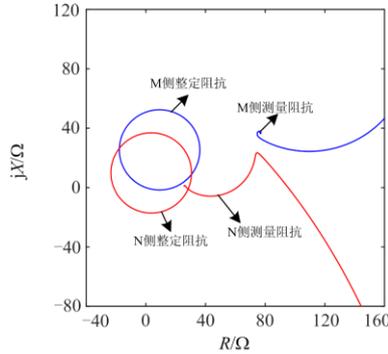
Fig. 7 Characteristics of protective action of longitudinal direction of conventional distance when fault is 50 km from the protective device on M-side



(a) $R_g=0 \Omega$



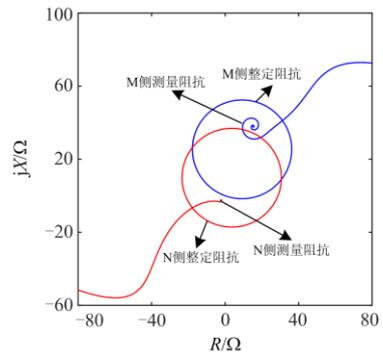
(b) $R_g=10 \Omega$



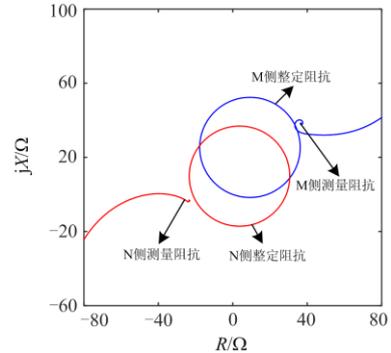
(c) $R_g=30 \Omega$

图 8 距 M 侧保护安装处 95 km 处故障时传统距离纵联方向保护动作特性

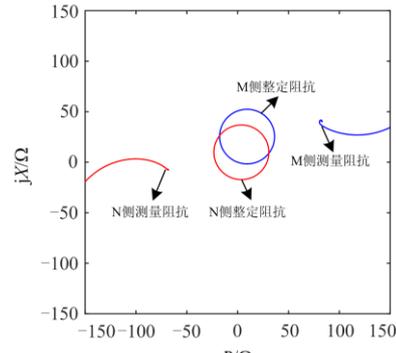
Fig. 8 Characteristics of protective action of longitudinal direction of conventional distance when fault is 95 km from the protective device on M-side



(a) $R_g=0 \Omega$



(b) $R_g=10 \Omega$



(c) $R_g=30 \Omega$

图 9 距 M 侧保护安装处 105 km 处故障时传统距离纵联方向保护动作特性

Fig. 9 Characteristics of protective action of longitudinal direction of conventional distance when fault is 105 km from the protective device on M-side

判断为反方向故障，传统距离纵联方向保护不能正确动作。在距 M 侧保护安装处 95 km、105 km 处发生 A 相经过渡电阻接地故障时，传统距离纵联方向保护动作特性如图 8 和图 9 所示。其他情况动作结果汇总如表 1 所示。

由表 1 可知，基于傅里叶算法的传统距离纵联方向保护在风电场送出线发生对称及不对称故障时，保护存在拒动现象。系统侧保护所测得的电压、电流可近似认为是电网电源单独作用时的结果^[27-29]。由表 1 可知，系统侧的距离方向元件在风电场送出线发生对称故障时能正确判别方向，保护能正确动作。发生单相经过渡电阻接地故障，且当过渡电阻分别为 0Ω 、 10Ω 时均能正确判别方向，保护能正确动作。当过渡电阻为 30Ω 时，保护不能正确动作。风电场侧短路电流中含有衰减频率分量，使傅里叶算法不能准确提取短路电流基频分量的幅值和相角。并且，由于过渡电阻的存在，也会导致距离方向元件不能正确判别方向，从而导致传统距离纵联方向保护不正确动作。

表 1 传统距离纵联方向保护动作情况

Table 1 Protective action of longitudinal direction of conventional distance

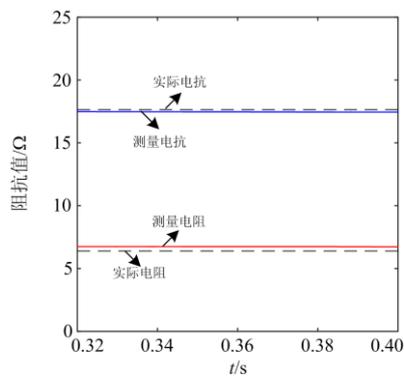
保护安装处	故障距离	相间方向元件判别结果		接地方向元件判别结果			
		三相短路(ABC)	两相短路(AB)	单相接地短路(AG)		两相接地短路(ABG)	
过渡电阻	—	0 Ω	0 Ω	0 Ω	10 Ω	30 Ω	0 Ω
风机侧	50 km	正向	正向	正向	正向	反向	正向
	95 km	不确定	不确定	不确定	反向	反向	不确定
	105 km	不确定	不确定	不确定	反向	反向	不确定
系统侧	50 km	正向	正向	正向	正向	反向	正向
	95 km	正向	正向	正向	正向	反向	正向
	105 km	反向	反向	反向	反向	反向	反向
保护动作情况	50 km	动作	动作	动作	动作	不动作	动作
	95 km	可能拒动	可能拒动	可能拒动	不动作	不动作	可能拒动
	105 km	可能误动	可能误动	可能误动	不动作	不动作	可能误动

3.2 时域距离纵联方向保护适应性分析

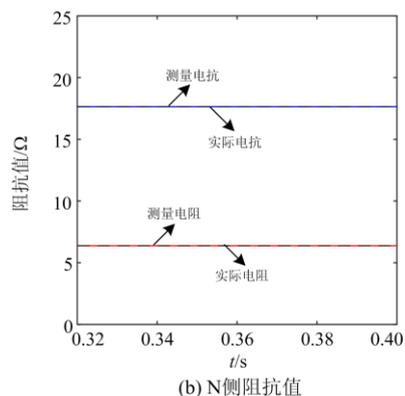
1) 对称故障

在 $t=0.3\text{ s}$ 时, 以风电场送出线分别在 50 km、95 km、105 km 处发生三相故障为例, 对时域距离纵联方向保护在风电场送出线的适应性分析, 时域距离纵联方向保护的動作特性如图 10—图 12 所示。

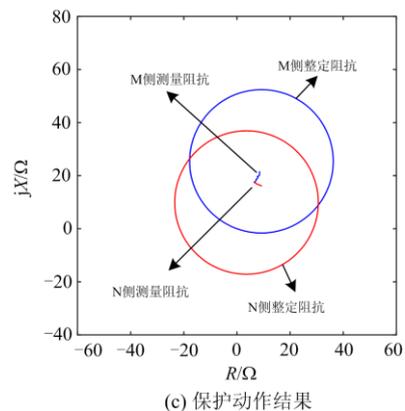
由图 10(a)和图 10(b)可知, 基于参数辨识的时域距离方向元件不受短路电流特性影响, 实际阻抗与辨识的阻抗基本相等。由图 10(c)可知, 在距 M 侧保护安装处 50 km 处发生三相金属性短路故障时, M 侧与 N 侧距离方向元件均判断为正方向故障, 时域距离纵联方向保护正确动作。由图 11(c) 可知, 在距 M 侧保护安装处 95 km 处发生三相金属性短路故障时, M 侧与 N 侧距离方向元件均判断为正方向故障, 时域距离纵联方向保护正确动作。由图 12(c)可知, 在距 M 侧保护安装处 105 km 处发生三相



(a) M侧阻抗值



(b) N侧阻抗值



(c) 保护动作结果

图 10 距 M 侧保护安装处 50 km 处故障时时域距离纵联方向保护动作特性

Fig. 10 Characteristics of protective action of longitudinal direction of time domain distance when fault is 50 km from the protective device on M-side

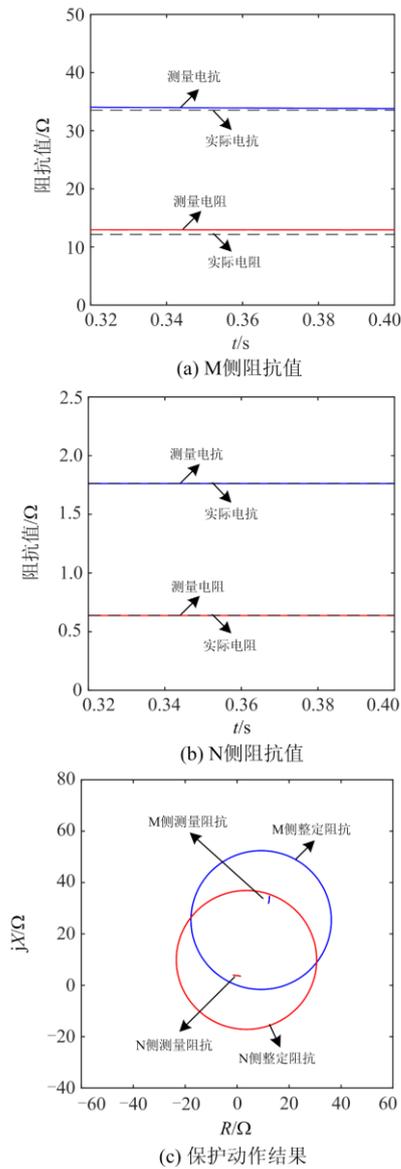


图 11 距 M 侧保护安装处 95 km 处故障时时域距离纵联方向保护动作特性

Fig. 11 Characteristics of protective action of longitudinal direction of time domain distance when fault is 95 km from the protective device on M-side

金属性短路故障时, M 侧与 N 侧距离方向元件均判断为反方向故障, 时域距离纵联方向保护不动作。其他情况动作结果汇总如表 2 所示。

2) 不对称故障

在 $t=0.3$ s 时, 以风电场送出线分别在 50 km、95 km、105 km 处发生 A 相经过渡电阻接地故障为例, 对时域距离纵联方向保护在风电场送出线的适应性分析, 时域距离纵联方向保护的動作特性如图 13—图 15 所示。

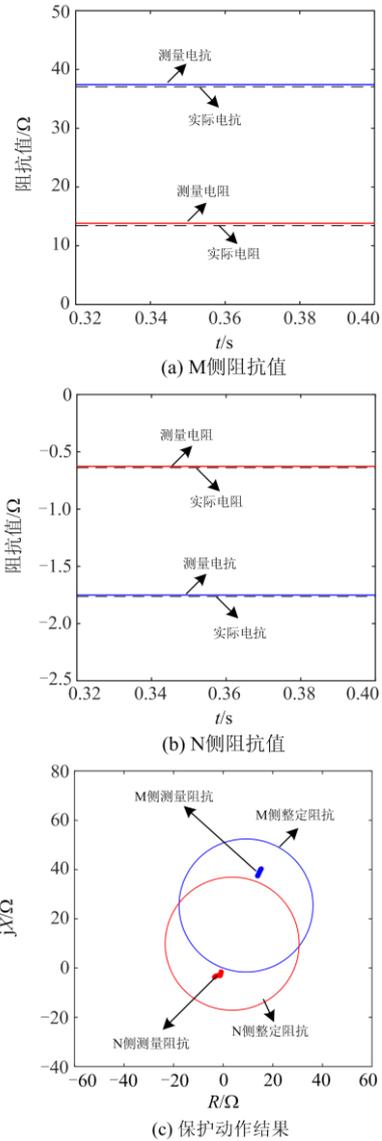
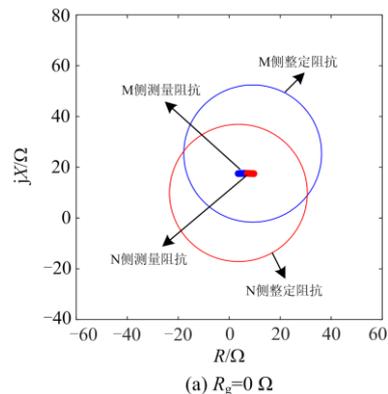


图 12 距 M 侧保护安装处 105 km 处故障时时域距离纵联方向保护动作特性

Fig. 12 Characteristics of protective action of longitudinal direction of time domain distance when fault is 105 km from the protective device on M-side



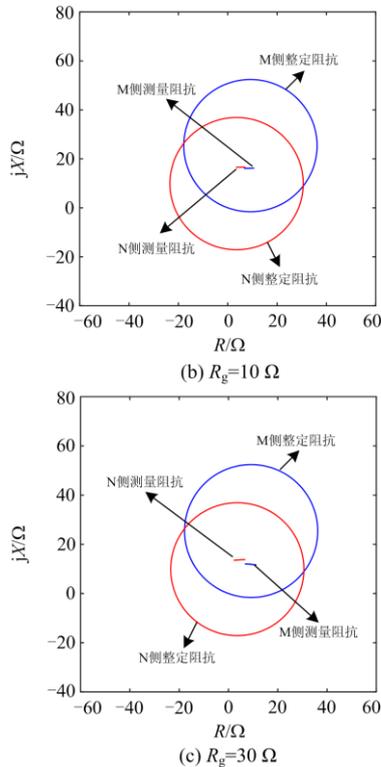


图 13 距 M 侧保护安装处 50 km 处故障时时域距离纵联方向保护动作特性

Fig. 13 Characteristics of protective action of longitudinal direction of time domain distance when fault is 50 km from the protective device on M-side

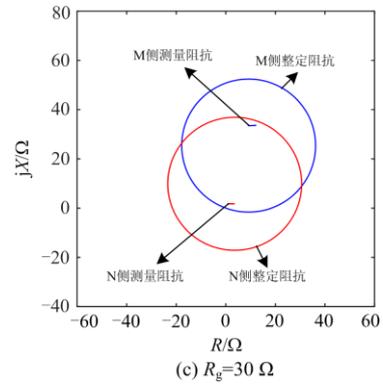
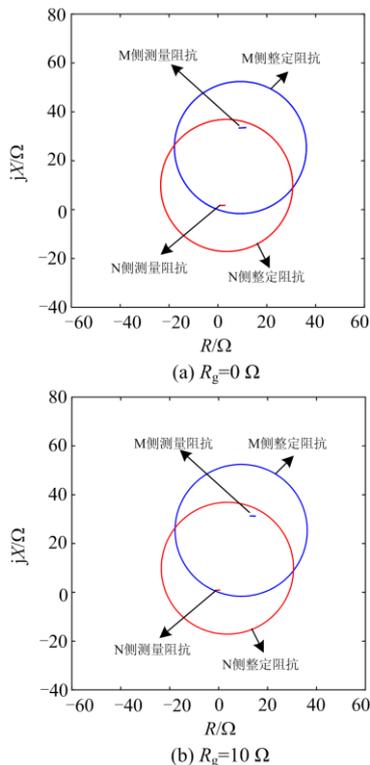
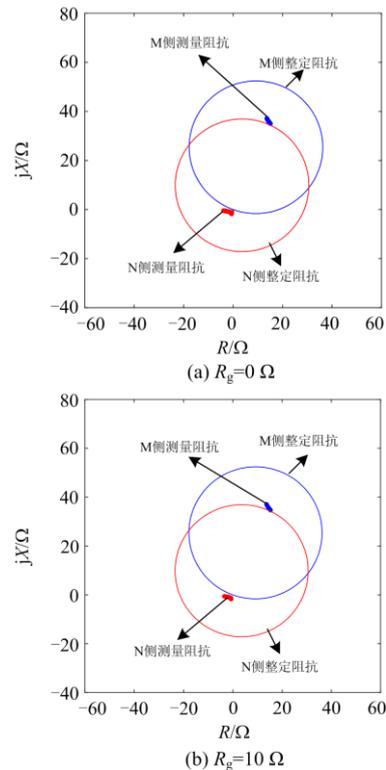


图 14 距 M 侧保护安装处 95 km 处故障时时域距离纵联方向保护动作特性

Fig. 14 Characteristics of protective action of longitudinal direction of time domain distance when fault is 95 km from the protective device on M-side

由图 13 可知, 在距 M 侧保护安装处 50 km 处发生 A 相过渡电阻接地故障, 且当过渡电阻分别为 $0\ \Omega$ 、 $10\ \Omega$ 、 $30\ \Omega$ 时, M 侧与 N 侧距离方向元件均判断为正方向故障, 时域距离纵联方向保护正确动作。由图 14 可知, 距 M 侧保护安装处 95 km 处发生 A 相过渡电阻接地故障, 且当过渡电阻分别为 $0\ \Omega$ 、 $10\ \Omega$ 、 $30\ \Omega$ 时, M 侧与 N 侧距离方向元件均判断为正方向故障, 时域距离纵联方向保护正确动作。由图 15 可知, 距 M 侧保护安装处 105 km



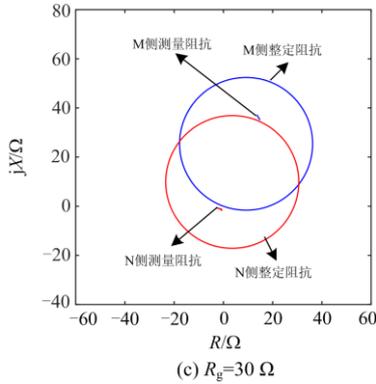


图 15 距 M 侧保护安装处 105 km 处故障时时域距离纵联方向保护动作特性

Fig. 15 Characteristics of protective action of longitudinal direction of time domain distance when fault is 105 km from the protective device on M-side

处发生 A 相经过渡电阻接地故障，且当过渡电阻分别为 0 Ω、10 Ω、30 Ω 时，M 侧与 N 侧距离方向元件均判断为反方向故障，时域距离纵联方向保护不动作。其他情况动作结果汇总如表 2 所示。

由表 2 可知，基于参数辨识的时域距离纵联方向保护在风电场送出线发生对称及不对称故障时，时域距离纵联方向保护不受短路电流特性影响且具有抗过渡电阻能力，保护均能正确动作。

4 结论

通过对传统距离纵联方向保护与时域距离纵联方向保护在风电接入系统的适应性分析，可以得出以下结论：

表 2 时域距离纵联方向保护动作情况

Table 2 Protective action of longitudinal direction of time domain distance

保护安装处	故障距离	相间方向元件判别结果		接地方向元件判别结果			
		三相短路(ABC)	两相短路(AB)	单相接地短路(AG)		两相接地短路(ABG)	
过渡电阻	—	0 Ω	0 Ω	0 Ω	10 Ω	30 Ω	0 Ω
风机侧	50 km	正向	正向	正向	正向	正向	正向
	95 km	正向	正向	正向	正向	正向	正向
	105 km	反向	反向	反向	反向	反向	反向
系统侧	50 km	正向	正向	正向	正向	正向	正向
	95 km	正向	正向	正向	正向	正向	正向
	105 km	反向	反向	反向	反向	反向	反向
保护动作情况	50 km	动作	动作	动作	动作	动作	动作
	95 km	动作	动作	动作	动作	动作	动作
	105 km	不动作	不动作	不动作	不动作	不动作	不动作

1) 受风电场频偏特性及过渡电阻的影响，基于工频量的传统距离纵联方向保护存在误差阻抗，该误差阻抗会造成距离方向元件不能正确动作。

2) 时域距离方向元件采用解微分方程的方法求取风电场送出线两端的电阻、电感，能够准确、快速判别故障方向。

3) 时域距离纵联方向保护不受风电场侧短路电流频率偏移的影响，所需数据窗较短，并且具有较强抗过渡电阻的能力。

附录 A

$$\begin{aligned} \dot{I}_{c1} &= A_c \angle \varphi_c; \quad \Delta \dot{I}_c = \Delta I_c \angle \Delta \varphi_c; \\ \Delta I_c &= \sqrt{A_c^2 + 2A_c (\Delta I_{\cos_c} \sin \varphi + \Delta I_{\sin_c} \cos \varphi) + \Delta I_{\cos_c}^2 + \Delta I_{\sin_c}^2} - A_c \\ \angle \Delta \varphi_c &= \arctan \left(\frac{A_c \sin \varphi_c + \Delta I_{\cos_c}}{A_c \cos \varphi_c + \Delta I_{\sin_c}} \right) - \varphi_c \end{aligned}$$

$$A_c = -(1-k)u_s \cdot$$

$$\sqrt{\left(\frac{R_{rc} L_m^2 s}{L_D^2 (\tau_{rc}^2 + s^2 \omega_1^2)} \right)^2 + \left(\frac{R_{rc} L_m^2 \tau_{rc}}{L_D^2 \omega_1 (\tau_{rc}^2 + s^2 \omega_1^2)} - \frac{L_r}{L_D \omega_1} \right)^2}$$

$$L_D = L_s L_r - L_m^2$$

$$\tau_{rc} = R_{rc} L_s - L_D$$

式中： φ_c 为撬棒保护动作后短路电流的初相角； u_s 为故障后DFIG的机端电压； R_{rc} 为计及Crowbar保护动作的转子等效电阻； L_s 、 L_r 分别为DFIG定、转子电感， $L_s = L_m + L_{gs}$ ， $L_r = L_m + L_{gr}$ ，其中 L_{gs} 、 L_{gr} 分别为定、转子漏感， L_m 为定转子绕组互感； ω_1 为同步转速； $s = (\omega_1 - \omega_r) / \omega_1$ 为转差率， ω_r 为转子转速； ΔI_{\cos_c} 、 ΔI_{\sin_c} 为计及Crowbar保护动作的电流基频相量的余弦和正弦误差。

参考文献

- [1] EL-NAGGAR A, ERLICH I. Short-circuit current reduction techniques of the doubly-fed induction generator based wind turbines for fault ride through enhancement[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2017, 11(7): 1033-1040.
- [2] ROBERGE P, LEMAY J, RUEL J, et al. Field analysis, modeling and characterization of wind turbine hot air ice protection systems[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 163: 19-26.
- [3] XU Kehan, ZHANG Zhe, LAI Qinghua, et al. Fault phase selection method applied to tie line of renewable energy power stations[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14(13): 2549-2557.
- [4] 何倩. 双馈风电场并网对送出线路继电保护的影响及改善措施[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
HE Qian. Impact of doubly-fed wind power grid integration on transmission line relay protection and improvement measures[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [5] LUO K, SHI W, WANG W. Extreme scenario extraction of a grid with large scale wind power integration by combined entropy-weighted clustering method[J]. *Global Energy Interconnection*, 2020, 3(2): 140-148.
- [6] SRIVASTAVA S, SHENOY U J, BISWAL A C, et al. Impedance seen by distance relays on lines fed from fixed speed wind turbines[J]. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2013, 14(1): 17-24.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 陶鸿飞, 谢栋, 赵福林, 等. 含大规模风电并网电力系统的关健线路综合辨识[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(6): 115-123.
TAO Hongfei, XIE Dong, ZHAO Fulin, et al. Comprehensive identification of critical line in power systems with large-scale wind power integration[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(6): 115-123.
- [10] 肖超, 韩伟, 李琼林, 等. 柔性直流输电系统交流侧线路继电保护适应性研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(4): 1-8.
XIAO Chao, HAN Wei, LI Qionglin, et al. Adaptability of MMC-HVDC system on relay protection of AC transmission lines[J]. *Smart Power*, 2020, 48(4): 1-8.
- [11] 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. DOI: 10.1186/s41601-017-0050-4.
- [12] 翁汉琮, 陈皓, 万毅, 等. 基于 Bhattacharyya 距离算法的线路纵联保护新判据[J]. *电网技术*, 2020, 44(2): 751-760.
WENG Hanli, CHEN Hao, WAN Yi, et al. Novel criterion applicable to transmission line pilot protection based on Bhattacharyya distance algorithm[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(2): 751-760.
- [13] 李振兴, 王露, 谭洪, 等. 基于 U-I 特性的 UHVDC 线路纵联保护新判据[J]. *智慧电力*, 2020, 48(10): 16-23.
LI Zhenxing, WANG Lu, TAN Hong, et al. New criterion for pilot protection of UHVDC transmission lines based on U-I characteristic[J]. *Smart Power*, 2020, 48(10): 16-23.
- [14] 李晓华, 刘飘, 蔡旺延, 等. 适用于同塔四回输电线路的保护性能评估系统[J]. *电力科学与技术学报*, 2019, 34(1): 59-66.
LI Xiaohua, LIU Piao, CAI Wangyan, et al. A protection performance evaluation system for four-circuit transmission lines on the same tower[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2019, 34(1): 59-66.
- [15] 张保会, 王进, 原博, 等. 风电接入对继电保护的影响(四)—风电场送出线路保护性能分析[J]. *电力自动化设备*, 2013, 33(4): 1-5, 11.
ZHANG Baohui, WANG Jin, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (4): performance analysis for wind farm outgoing transmission line protection[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(4): 1-5, 11.
- [16] 陈伟伟, 李凤婷, 张玉, 等. 风电 T 接双电源系统对距离保护的影响分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(7): 108-114.
CHEN Weiwei, LI Fengting, ZHANG Yu, et al. Impact of

- wind farm on distance protection for T-connected to the dual power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 108-114.
- [17] 李菁, 郑涛, 赵裕童, 等. 双馈风电短路电流特性对距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 37-47.
LI Jing, ZHENG Tao, ZHAO Yutong, et al. Impact of doubly-fed wind system short-circuit current characteristics on the transmission line distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 37-47.
- [18] 许偲轩, 陆于平. 适用于含分布式电源配电网的纵联保护方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 113-118, 155.
XU Sixuan, LU Yuping. A pilot protection method for distribution network with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 113-118, 155.
- [19] 丛伟, 田崇稳, 赵义术, 等. 基于电压变化量幅值比较的智能配电网故障方向元件[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 93-99.
CONG Wei, TIAN Chongwen, ZHAO Yishu, et al. A fault directional element based on voltage variation amplitude comparison for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 93-99.
- [20] 索南加乐, 王向兵, 孟祥来, 等. 基于 R-L 模型的参数识别快速方向元件[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(6): 689-693.
SUONAN Jiale, WANG Xiangbing, MENG Xianglai, et al. Quick directional element based on R-L model parameter identification[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(6): 689-693.
- [21] 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.
- [22] 贾科, 郑黎明, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的风电场送出线路纵联保护[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.
- [23] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [24] 范小红, 孙士云, 张雪娟, 等. 双馈风电场短路电流特性对距离保护的影响及保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 18-27.
FANG Xiaohong, SUN Shiyun, ZHANG Xuejuan, et al. Study on the influence of short-circuit current characteristics of a doubly-fed wind farm on distance protection and protection strategy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 18-27.
- [25] 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): performance analysis for wind farm outgoing line distance protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 1-6.
- [26] DE ARAUJO A R J, DA SILVA R C, KUROKAWA S. Reducing the spurious oscillations in the lumped parameters model using low-pass filter[J]. IEEE Latin America Transactions, 2015, 13(4): 1029-1034.
- [27] 任冲, 柯贤波, 樊国伟, 等. 大规模风电直流送出系统过电压抑制措施及控制方案优化研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 163-174.
REN Chong, KE Xianbo, FAN Guowei, et al. Transient voltage stabilization and control optimization for large-scale wind power UHV DC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 163-174.
- [28] YANG J, WANG B. Adaptability analysis of fault component differential protection in large capacity double-fed wind farm outgoing transmission line protection[C] // 2016 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE), October 19-22, 2016, Chengdu, China: 221-225.
- [29] SONG Jiehui, YANG Bingyuan, WU Junjie. Adaptability analysis of sampled value differential protection in bus with double-fed wind farm entrance line[J]. Materials Science and Engineering, 2018, 394(4).

收稿日期: 2020-09-13; 修回日期: 2020-12-09

作者简介:

王春又(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为风力发电及其对电力系统保护的影响; E-mail: 1005850903@qq.com

孙士云(1981—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 49005540@qq.com

毛肖(1981—), 男, 通信作者, 工学硕士, 研究方向为风电并网技术及其继电保护。E-mail: 422416503@qq.com

(编辑 周金梅)