

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200019

适用于双馈风电场送出线不对称故障的时域距离保护

范小红, 孙士云, 王春又, 赵伟

(昆明理工大学, 云南 昆明 650500)

摘要: 目前, 双馈风电场不对称短路电流特性对风电场送出线距离保护的影响以及相关优化策略的研究, 主要是在计及 Crowbar 保护动作的基础上进行的, 少有研究系统发生不对称故障后计及 RSC 控制的短路电流特性对传统距离保护的影响。基于此, 分析了系统发生不对称接地故障后, 计及 Crowbar 保护和 RSC 控制两种运行工况下的短路电流特性, 解析推导了这两种运行工况下离散傅里叶算法提取基频分量产生的误差表达式。在此基础上分析双馈风机短路电流特性对传统距离保护的影响, 从而提出了不受风电场短路电流特性影响的具有抗过渡电阻能力的时域距离保护。最后在 Matlab/Simulink 平台上建立 DFIG 电磁暂态仿真模型, 仿真分析了风电场送出线发生单相经过渡电阻接地后, 计及 Crowbar 保护动作和 RSC 控制两种运行工况下传统距离保护和时域距离保护的動作特性。

关键词: 双馈风机; 短路电流; 不对称故障; 距离保护

Time domain distance protection for asymmetric faults of an outgoing line in doubly-fed wind farms

FAN Xiaohong, SUN Shiyun, WANG Chunyou, ZHAO Wei

(Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: At present, research on the influence of asymmetric short-circuit current characteristics of a DFIG wind farm on the distance protection of the outgoing line of the farm and the related optimization strategy are mainly based on the action of crowbar protection. There are few studies on the influence of short-circuit current characteristics of RSC control on traditional distance protection after an asymmetric fault occurs. The short-circuit current characteristics of crowbar protection and RSC control under two operating conditions are analyzed, and the error expression of the fundamental frequency component extracted by discrete Fourier algorithm under these two operating conditions is analyzed. The influence of short-circuit current characteristics of the DFIG on traditional distance protection is analyzed. Time domain distance protection with transient resistance is not affected by short-circuit current characteristics of wind farms. Finally, a DFIG electromagnetic transient simulation model is established on the MATLAB/Simulink platform, and the operational characteristics of traditional distance protection and the time-domain distance protection under two operating conditions, including crowbar protection action and RSC control, are simulated and analyzed after single-phase grounding of the wind farm outgoing line through transition resistance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China “Research on Strategy Setting, Risk Assessment, and Its Coordination Optimization of Coincide Time Sequence under Multi Perspectives” (No. 51367009).

Key words: doubly fed induction generator (DFIG); short circuit current; asymmetric fault; distance protection

0 引言

近年来, 风力发电得到了快速发展, 电力系统中风电渗透率不断升高, 2017 年我国风电渗透力已

达到 9.2%。风力发电机种类较多, 其中双馈风机 (DFIG) 凭借调速范围宽、对变频器容量需求小等优点成为大型风电场的主流机型 [1-7]。但由于双馈风机的并网方式和运行方式, DFIG 提供的短路电流与传统电源存在明显差别, 导致双馈风电场送出线故障特征较常规线路发生较大改变, 因此基于常规能源线路的传统保护原理在双馈风电场送出线中的

基金项目: 国家自然科学基金“多视角下重合时序的策略整定、风险评估及其协调优化研究”(51367009)

适应性存在一定问题^[8-15]。

目前,已有大量学者在风电机组短路电流特性、双馈风电场送出线保护适应性方面开展了大量的研究工作,并取得了一系列的研究成果。文献[16-19]分析了计及 Crowbar 保护动作后,DFIG 的短路电流特性与传统电源之间的差异,研究了双馈风机对称和不对称两种故障情况下,双馈风机的短路电流解析式;文献[20-21]分析了 Crowbar 保护未动作时,计及转子侧变流器(RSC)控制的双馈风机对称和不对称故障下的短路电流解析式。文献[22]研究了风电场低电压穿越对零序电流保护的影响;文献[23]研究风机低电压穿越方式下,风电场弱馈特性对功率方向元件的影响。文献[24-27]分析了计及 Crowbar 保护动作情况下,双馈风机短路电流特性对距离保护的影响,其中文献[24]表明了 DFIG 短路电流偏移工频,使得基于傅里叶工频算法的传统距离保护不能准确地测得阻抗,从而造成距离元件的误动作;文献[25]表明由于过渡电阻的存在,风电场送出线距离保护会受系统运行参数和风电场运行参数的影响;文献[26]分析了风电场联络线阻抗圆动作特性,对传统距离保护在风电场联络线的适应性进行了分析,提出了自适应距离保护的方案;文献[27]研究双馈风电场接入系统后高次谐波、频偏特性对传统工频量距离保护的影响,提出了一种抗高阻接地的时域距离保护原理。

以上文献在研究双馈风机系统时,对于 DFIG 短路电流特性方面的研究比较全面,考虑了系统对称和不对称故障下,计及 Crowbar 保护动作和 RSC 控制两种情况下双馈风机的短路电流特性,但在研究 DFIG 短路电流特性对传统距离保护影响时,主要是在计及 Crowbar 保护动作后 DFIG 短路电流频偏特性的基础上进行,少有文献研究不对称故障下,计及 RSC 控制的短路电流特性中暂态自然分量对保护的影响。实际上,系统发生故障后,双馈风机的 Crowbar 保护不一定会动作,在 DFIG 机端电压非深度跌落的情况下,双馈风机短路电流不足以触发 Crowbar 保护动作,此时通过变流器控制来降低短路电流。

基于以上分析,本文首先分析了不对称故障下计及 Crowbar 保护动作和 RSC 控制两种运行工况下双馈风机的短路电流特性,并分析了这两种运行工况下不对称短路电流特性对离散傅里叶算法的影响,同时研究了过渡电阻对测量电压的影响。在此基础上,研究双馈风机两种运行工况下不对称短路电流特性对传统距离保护的影响,由此提出一种不受转速频率分量和暂态自然分量影响的抗过渡电阻接

地故障的时域距离保护。最后,在 Matlab/Simulink 平台上建立 DFIG 电磁暂态仿真模型,仿真分析了风电场送出线发生单相短路接地故障后,考虑计及 Crowbar 保护动作和 RSC 控制两种运行工况下,传统距离保护和时域距离保护的動作特性。

1 DFIG 不对称短路电流特性对传统距离保护的影响

1.1 双馈风机不对称短路电流特性

目前,双馈风电场提供的短路电流主要包含两大类:一类是 DFIG 机端电压深度跌落下,计及 Crowbar 保护动作后的短路电流;另一类是非深度跌落下, Crowbar 保护不动作,此时计及转子侧变流器控制作用的短路电流。双馈风电场在这两种运行状态下提供的短路电流与传统电源提供的短路电流相比都存在显著差异,这种差异会造成基于傅里叶算法提取的工频量距离保护误动或拒动。本文主要分析不对称故障下双馈风机短路电流特性及其对距离保护的影响。

(1) 计及 Crowbar 保护动作

电网发生深度不对称故障时,双馈风机机端电压发生不对称跌落,此时计及 Crowbar 保护动作双馈风机的短路电流为^[21]

$$i_c = A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_{c1}) + B_1 \cos(-\omega_1 t + \varphi_{c2}) + C_1 e^{-\tau_s t} + D_1 e^{-\tau_{rc} t} \cos(\omega_1 t + \varphi_{c3}) \quad (1)$$

式中: A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 分别表示计及 Crowbar 保护的 DFIG 不对称短路电流正向工频分量系数、反向工频分量系数、直流分量系数、转速频率分量系数; ω_1 为同步转速; ω_r 为转子转速; φ_{c1} 、 φ_{c2} 、 φ_{c3} 分别表示计及 Crowbar 保护动作后短路电流正向工频分量初相角、反向工频分量初相角、转速频率分量初相角; τ_s 为定子时间衰减常数; τ_{rc} 为计及 Crowbar 保护的转子时间衰减常数。

由式(1)可知,计及 Crowbar 保护动作的 DFIG 不对称故障短路电流由正向工频分量、反向工频分量、暂态直流分量以及转速频率分量组成。其中正向工频分量的大小与机端电压正序分量成正相关,反向工频分量大小与机端电压负序分量成正相关,暂态直流分量与机端电压正负序分量以及故障前机端电压的值有关,以定子时间衰减常数衰减,转速频率分量与机端初始状态、故障后短路电流正负序分量以及暂态直流分量的初值有关,以计及 Crowbar 电阻的转子时间常数衰减。

(2) 计及 RSC 控制

电网发生非深度不对称故障时,计及 RSC 控制

的双馈风机不对称短路电流为^[21]

$$i_{\text{rsc}} = A_2 \cos(\omega_1 t + \varphi_{r1}) + B_2 \cos(-\omega_1 t + \varphi_{r2}) + C_2 e^{-\tau_s t} + D_2 i_{\text{r,abc}} \quad (2)$$

式中： A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 分别表示计及 RSC 控制的 DFIG 不对称短路电流正向工频分量系数、反向工频分量系数、暂态直流分量系数、暂态自然分量系数； φ_{r1} 、 φ_{r2} 分别表示计及 RSC 控制的正向工频分量初相角、反向工频分量初相角； $i_{\text{r,abc}}$ 表示转子侧变流器的转子激磁电流指令值。

由式(2)可知，计及 RSC 控制的 DFIG 不对称故障短路电流由正向工频分量、反向工频分量、暂态直流分量以及暂态自然分量组成。正向工频分量与电机参数、机端电压正序分量有关；反向工频分量与电机参数、机端电压负序分量有关；暂态直流分量与机端电压降落程度以及转子侧变流器 PI 控制参数有关；暂态自然分量是由转子激磁电流产生，该分量是一个衰减的谐波分量，其衰减程度取决于发电机转子参数和变流器 PI 控制参数。

1.2 DFIG 短路电流特性对傅里叶算法的影响

目前，双馈风电场送出线主要采用基于离散傅里叶算法(DFT)的工频量距离保护，但双馈风机提供的短路电流中特有的转速频率分量和暂态自然分量与基频分量相近，导致傅里叶算法无法准确提取基频分量，从而影响距离保护动作的正确性。

将原始信号 $x(k)$ 经离散傅里叶算法后，得到基波的余弦系数和正弦系数公式为^[28]

$$\begin{cases} I_{\cos} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x(k) \cos(\omega_1 k \Delta t) \\ I_{\sin} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x(k) \sin(\omega_1 k \Delta t) \end{cases} \quad (3)$$

式中： N 为基频周期内的采样点数； I_{\cos} 表示经 DFT 后基波电流的余弦系数； I_{\sin} 表示经 DFT 后基波电流的正弦系数。

根据式(3)所求的基波余弦系数和正弦系数，可进一步计算出电流基波分量的幅值和相位表达式为^[28]

$$\begin{cases} |I| = \sqrt{I_{\cos}^2 + I_{\sin}^2} \\ \angle|\varphi| = \arctan\left(\frac{I_{\cos}}{I_{\sin}}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $|I|$ 为基波电流的幅值； $\angle|\varphi|$ 为基波电流的相角。

将式(1)和式(2)短路电流信号经差分滤波器处理，滤除暂态直流分量后，分别代入离散傅里叶算法提取基波分量式(3)中，可得计及 Crowbar 保护和 RSC 控制的短路电流，经傅里叶算法计算后，电流

基波分量的正、余弦系数分别为

$$\begin{cases} I_{\cos_c} = A_1 \cos \varphi_{c1} + B_1 \cos \varphi_{c2} + \Delta I_{\cos_c} \\ I_{\sin_c} = A_1 \sin \varphi_{c1} + A_1 \sin \varphi_{c2} + \Delta I_{\sin_c} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} I_{\cos_{\text{rsc}}} = A_2 \sin \varphi_{r1} + B_2 \sin \varphi_{r2} + \Delta I_{\cos_{\text{rsc}}} \\ I_{\sin_{\text{rsc}}} = A_2 \cos \varphi_{r1} + B_2 \cos \varphi_{r2} + \Delta I_{\sin_{\text{rsc}}} \end{cases} \quad (6)$$

式中： I_{\cos_c} 、 I_{\sin_c} 分别表示计及 Crowbar 保护动作后经 DFT 提取的基波分量的余弦系数和正弦系数； ΔI_{\cos_c} 、 ΔI_{\sin_c} 分别表示计及 Crowbar 保护动作后 DFT 提取基波分量的正弦、余弦误差； $I_{\cos_{\text{rsc}}}$ 、 $I_{\sin_{\text{rsc}}}$ 分别表示计及 RSC 控制后经 DFT 提取的基波分量的余弦系数和正弦系数； $\Delta I_{\cos_{\text{rsc}}}$ 、 $\Delta I_{\sin_{\text{rsc}}}$ 分别表示计及 RSC 控制后 DFT 提取基波分量的余弦、正弦误差。

将式(5)和式(6)分别代入式(4)中，可得到经 DFT 后，计及 Crowbar 保护动作和 RSC 控制的基波分量的电流幅值和相位分别为

$$\begin{cases} |I_c| = \sqrt{I_{\cos_c}^2 + I_{\sin_c}^2} = I_{c1} + \Delta I_c \\ \angle|I_c| = \arctan\left(\frac{I_{\cos_c}}{I_{\sin_c}}\right) = \varphi_{c1} + \Delta \varphi_c \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} |I_{\text{rsc}}| = \sqrt{I_{\cos_{\text{rsc}}}^2 + I_{\sin_{\text{rsc}}}^2} = I_{\text{rsc}1} + \Delta I_{\text{rsc}} \\ \angle|I_{\text{rsc}}| = \arctan\left(\frac{I_{\cos_{\text{rsc}}}}{I_{\sin_{\text{rsc}}}}\right) = \varphi_{r1} + \Delta \varphi_{\text{rsc}} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $|I_c|$ 、 $\angle|I_c|$ 分别表示计及 Crowbar 保护动作后 DFT 提取的基频分量的幅值和相角； $|I_{\text{rsc}}|$ 、 $\angle|I_{\text{rsc}}|$ 分别表示计及 RSC 控制后 DFT 提取的基频分量的幅值和相角； I_{c1} 、 ΔI_c 分别表示计及 Crowbar 保护动作后基频分量幅值的正常项和误差项； $I_{\text{rsc}1}$ 、 ΔI_{rsc} 分别表示计及 RSC 控制后基频分量幅值的正常项和误差项； $\Delta \varphi_c$ 为计及 Crowbar 保护动作后基频分量相角的误差项； $\Delta \varphi_{\text{rsc}}$ 为计及 RSC 控制后基频分量相角的误差项。

由式(7)、式(8)可知，计及 Crowbar 保护动作的不对称短路电流经离散傅里叶算法提取后，除基频分量 I_{c1} 外，受转速频率的影响，还存在误差量 ΔI_c 。计及 RSC 控制的不对称短路电流 DFT 算法同样不能准确提取其基频分量，也存在一个提取的误差量 ΔI_{rsc} 。

1.3 傅里叶算法提取误差对工频量距离保护的影响

传统工频量距离保护的原理是通过比较保护安装处到故障点之间阻抗与整定值的大小，判断区内外故障，保护安装处到故障点的测量阻抗可表示为^[29]

$$Z_m = \frac{\mathcal{U}_m}{\mathcal{I}_m} \quad (9)$$

式中, \dot{U}_m 、 \dot{I}_m 分别表示保护安装处的测量电压和测量电流。

式(9)中测量电压 \dot{U}_m 和测量电流 \dot{I}_m 均是根据线路瞬间电压、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不对称故障时, 风电场侧电压由电网电压支撑, 主要为工频分量, 但根据 1.1 节分析可知, 风电场侧提供的短路电流不再是工频分量。由 1.2 节可知, 计及 Crowbar 保护动作时, 由于衰减的转速频率分量的存在, 导致 DFT 算法提取工频分量电流时存在误差量 ΔI_c 。计及 RSC 控制时, 受暂态自然分量的影响, 也使得 DFT 算法提取的工频量不准确。将 1.2 节中经 DFT 计算后得到的短路电流工频分量代入式(9), 可得计及 Crowbar 保护动作和 RSC 控制两种运行工况下, 风电场送出线保护安装处测量阻抗的误差为

$$\begin{cases} \Delta Z_c = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_{c1} + \Delta \dot{I}_c} - \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_{c1}} \\ \Delta Z_{rsc} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_{rsc1} + \Delta \dot{I}_{rsc}} - \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_{rsc1}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\dot{I}_{c1} = A_{sc} \angle \varphi_c$; $\Delta \dot{I}_c = \Delta I_c \angle \Delta \varphi_c$; $\dot{I}_{rsc1} = A_{rsc} \angle \varphi_{rsc}$; $\Delta \dot{I}_{rsc} = \Delta I_{rsc} \angle \Delta \varphi_{rsc}$ 。

由式(10)可知, 计及 Crowbar 保护动作的测量阻抗误差为 ΔZ_c , 计及 RSC 控制的测量阻抗误差为 ΔZ_{rsc} 。由于在风电场两种运行工况下, 基于工频量的传统距离保护均存在误差阻抗, 该误差阻抗会造成距离保护不能正确动作。

在此基础上分析过渡电阻对距离保护的影响, 过渡电阻的存在使得保护安装处的测量阻抗、测量电压发生变化。经过渡电阻接地故障的网络图如图 1 所示。

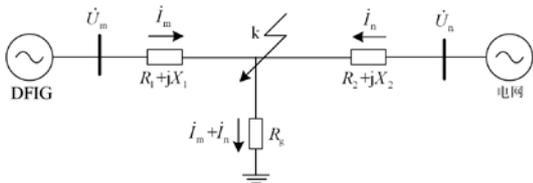


图 1 故障网络图

Fig. 1 Fault network diagram

根据图 1 的故障网络图, 可列写测量电压方程。

$$\dot{U}_m = (R_1 + jX_1) \dot{I}_m + R_g (\dot{I}_m + \dot{I}_n) \quad (11)$$

由式(9)可知, 当过渡电阻 R_g 为 0 时, 测量电压与测量电流的比值, 可以准确地反映线路故障点到保护安装处的距离, 但过渡电阻不为 0 时, 将使距离保护测量得到的测量电压不再是故障点到保护安装处的压降, 而是故障点到保护安装处线路阻抗上

的压降与过渡电阻上的压降之和, 根据该测量电压得到的测量阻抗不能正确反映线路的实际故障位置。

2 时域距离保护在风电场送出线的适应性分析

由以上分析可知, 双馈风电场提供的不对称短路电流特性将使得基于 DFT 算法的传统距离保护不能正确动作, 基于此, 提出了适应于双馈风电场送出线接地故障的时域距离保护。时域距离保护是在时域上构建的保护原理, 将故障点到保护安装处的线路模型用电阻、电感表示, 即等效为 R-L 线路模型, 如图 2 所示。

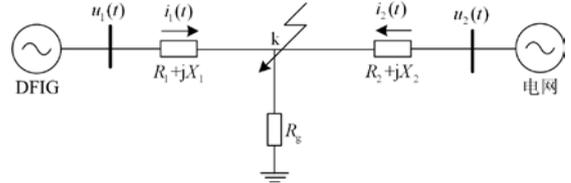


图 2 系统故障瞬时值等效图

Fig. 2 Instantaneous value equivalent diagram of system fault

根据图 2 可列写风电场送出线的时域方程为

$$u_1(t) = R_1 i_1(t) + L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + R_g (i_1(t) + i_2(t)) \quad (12)$$

式中: $u_1(t)$ 、 $i_1(t)$ 分别为风电场保护安装处故障相电压、电流瞬时值; R_1 、 L_1 分别为风电场侧故障线路的电阻和电感; $i_2(t)$ 为电网侧保护安装处故障相电流瞬时值; R_g 表示过渡电阻。

对于接地故障, 测量电压取保护安装处的相电压, 电流采用带零序补偿接线, 以 A 相为例, 并对微分方程离散化处理, 则式(12)可写为

$$\begin{aligned} u_{ma}(t) = & R_1 (i_{ma}(t) + K_r i_0(t)) + R_g (i_{ma}(t) + i_2(t)) + \\ & L_1 \frac{(i_{ma}(t) + K_r i_0(t)) - (i_{ma}(t - \Delta t) + K_r i_0(t - \Delta t))}{\Delta t} \end{aligned} \quad (13)$$

式中, K_r 、 K_l 分别表示零序电阻、电感的补偿系数。

对于相间故障, 测量电压取保护安装处故障相之间的电压差, 测量电流取故障相之间的电流差, 以 A、B 相为例, 式(12)可写为

$$\begin{aligned} u_{ma}(t) - u_{mb}(t) = & R_1 (i_{ma}(t) - i_{mb}(t)) + R_g (i_{ma}(t) + i_{2a}(t)) + \\ & L_1 \frac{(i_{ma}(t) + i_{mb}(t)) - (i_{ma}(t - \Delta t) + i_{mb}(t - \Delta t))}{\Delta t} \end{aligned} \quad (14)$$

由式(13)和式(14)可知, 接地故障和相间故障均含有 R_1 、 L_1 、 R_g 三个未知量, 根据测量电压和测量电流的瞬时值, 利用最小二乘法对未知量进行参

数识别, 得到故障点到保护安装处的 R_1 和 L_1 值。

根据所识别的电阻、电感, 采用方向圆特性, 则距离保护判据为

$$\begin{cases} \left| (R_1 + jL_1) - \frac{1}{2}Z_{set} \right| < \left| \frac{1}{2}Z_{set} \right| & \text{区内故障} \\ \left| (R_1 + jL_1) - \frac{1}{2}Z_{set} \right| > \left| \frac{1}{2}Z_{set} \right| & \text{区外故障} \end{cases} \quad (15)$$

式中, Z_{set} 是整定阻抗。

3 仿真验证及分析

为分析风电场送出线发生不对称过渡电阻故障后, 传统距离保护和时域距离保护的動作特性, 在 Matlab/Simulink 上建立如图 3 所示并网双馈风力发电机的电磁暂态仿真模型, 双馈风电场每台风机经箱变(575 V/35 kV)连接在 35 kV 汇流母线上, 再通过主变将电压升高到 110 kV, 最后通过 100 km 长的风电场送出线将电能送入系统, 单位长度正序线路电阻、电感分别为 0.115 3 Ω /km、1.05 mH/km。仿真系统中双馈风电场的风总机台数为 60 台, 其中每台风机输出的有功功率为 1.5 MW, 额定电压为 575 V, 额定转速为 1.2 p.u., 定、转子电阻分别为 0.023 p.u.、0.016 p.u., 定、转子漏感分别为 0.18 p.u.、0.16 p.u., 定转子之间的互感为 2.9 p.u., 撬棒阻值为 0.05 p.u.。

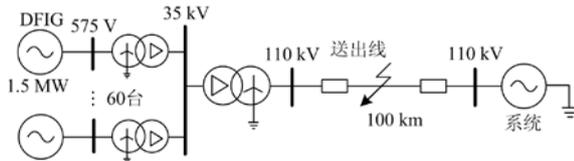


图 3 并网双馈风机的电磁暂态仿真模型

Fig. 3 Electromagnetic transient simulation model of grid-connected doubly-fed wind turbine

本文将距离保护 I 段作为研究对象, 设置整定系数值为 0.8, 即 I 段保护的動作范围为本线路全长的 80%。根据输电线路参数, 可得距离保护 I 段的整定阻抗为

$$\begin{aligned} Z_{set} &= K_{rel} \times Z_L = \\ &0.8 \times (0.1153 + j1.05 \times 10^{-3} \times 314) \times 100 = \\ &(9.224 + j26.376)\Omega \end{aligned} \quad (16)$$

根据整定阻抗值, 以 $\frac{1}{2}Z_{set}$ 为圆心, $\left| \frac{1}{2}Z_{set} \right|$ 为半径, 确定过原点的整定阻抗圆。将式(16)的整定值代入式(15), 再根据测量得到测量电阻和电抗, 判断距离保护是否能正确動作。由于风电场线路全长为 100 km, 当保护范围为线路全长 80% 时, 理论上

当故障点距离保护安装处的距离小于 80 km 时, 保护動作, 反之, 保护不动作, 但使用方向圆特性时, 线路首端 0 km 处为死区, 易发生误判。

3.1 传统距离保护動作特性分析

由以上分析可知, 双馈风机在两种运行工况下, 其短路电流与传统电机都存在着显著差异, 计及 Crowbar 保护動作的转速频率分量和计及 RSC 控制的暂态自然分量, 都会导致离散傅里叶算法不能准确提取短路电流基频分量。为分析 DFIG 两种运行工况下不对称短路电流对传统距离保护的影响, 分别以 1 s 时风电场送出线 5 km(首端故障)、45 km(区内故障)、75 km(区内故障)、85 km(区外故障)处发生 A 相接地故障为例, 当接地电阻分别为 0 Ω 、10 Ω 、30 Ω 时, 分析传统距离保护的動作特性, 保护動作结果如表 1 所示。

表 1 传统距离保护動作情况

Table 1 Operation of traditional distance protection

故障点	过渡电阻/ Ω	计及 Crowbar 動作	计及 RSC 控制
5 km (首端)	0	動作	動作
	10	不动作	不动作
	30	不动作	不动作
45 km (区内)	0	動作	動作
	10	不动作	不动作
	30	不动作	不动作
75 km (区内远端)	0	可能拒動	可能拒動
	10	不动作	不动作
	30	不动作	不动作
85 km (区外近端)	0	可能误動	可能误動
	10	不动作	不动作
	30	不动作	不动作

由表 1 可知, 传统距离保护受双馈风电场短路电流特性以及过渡电阻的影响, 将导致保护不能正确動作, 具体保护動作特性的仿真结果如图 4—图 7 所示。

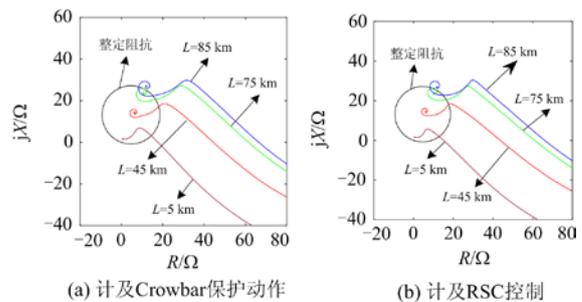


图 4 风电场送出线发生 A 相金属性接地故障传统距离保护動作特性

Fig. 4 Operation characteristics of traditional distance protection for phase A metal grounding fault occurring on wind farm outgoing lines

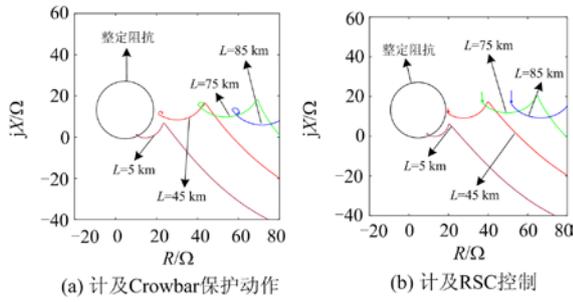


图 5 风电场送出线 A 相经 $10\ \Omega$ 过渡电阻接地故障的传统距离保护动作特性

Fig. 5 Operation characteristics of traditional distance protection for ground fault of phase A of wind farm feeder through $10\ \Omega$ transition resistance

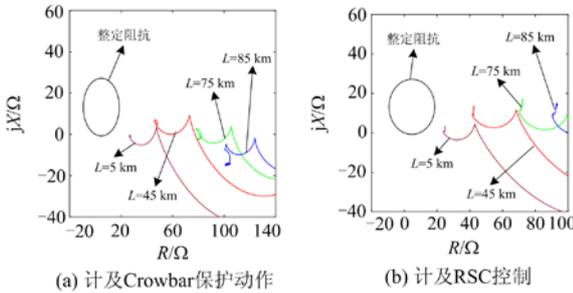


图 6 风电场送出线 A 相经 $30\ \Omega$ 过渡电阻接地故障的传统距离保护动作特性

Fig. 6 Operation characteristics of traditional distance protection for ground fault of phase A of wind farm feeder through $30\ \Omega$ transition resistance

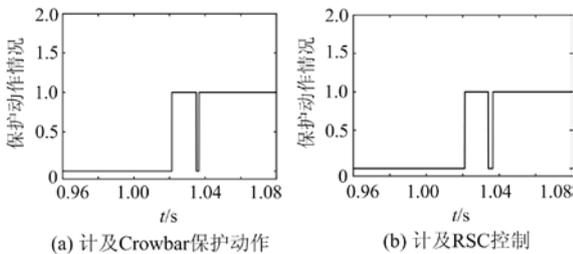


图 7 风电场送出线 75 km 处发生 A 相金属性故障保护动作情况

Fig. 7 Protection action of phase A metal fault at 75 km of wind farm feeder line

由图 4 可知, 距保护安装处 5 km、45 km 区内近端故障时, 两种运行工况下, 距离保护均能正确动作。距保护安装处 75 km A 相金属性接地故障时, 保护动作情况如图 7 所示, 由图 4(a)和图 7(a)可知, 计及 Crowbar 保护动作的运行工况下, 在 1.02~1.035 s 时, 测量阻抗处于整定阻抗圆内, 但在 1.035~1.037 s 时间段内, 测量阻抗处于整定阻抗

圆圆外, 之后测量阻抗又处于整定阻抗圆内, 保护动作情况反复变化, 可能增加继电器动作和返回次数, 从而有可能造成保护不能正确动作。由图 4(b)和图 7(b)可知, 计及 RSC 控制的运行工况下, 测量阻抗轨迹同样也存在这种圆内圆外反复变化的情况。距保护安装处 85 km 区外故障时, 理论上故障时间段内测量阻抗值应大于整定阻抗值, 但实际结果表明, 计及 Crowbar 保护时短路电流中的转速频率分量、计及 RSC 控制时暂态自然分量的存在, 使得两种运行工况下都会出现测量阻抗值小于整定阻抗的情况, 从而造成保护误动。

由图 4—图 6 中 5 km、45 km 处发生单相接地故障时保护的動作情况可知, 当过渡电阻为 0, 即发生金属性接地时, 距离保护测量得到的测量阻抗小于整定阻抗, 保护能正确动作; 当过渡电阻为 $10\ \Omega$ 和 $30\ \Omega$ 两种情况下, 计及 Crowbar 保护动作和 RSC 控制的两种运行工况, 测量阻抗值都处于整定阻抗圆外, 保护拒动。

由图 4—图 5 可知, 区内近端 5 km、45 km 处 A 相发生接地故障, 金属性接地时, 两种运行工况下保护都能正确动作, 但经 $10\ \Omega$ 过渡电阻接地时, 两种运行工况下都会出现保护拒动的情况; 区内末端 75 km 处发生接地故障, 金属性故障时测量阻抗会出现圆内圆外反复的情况, 可能会造成保护拒动, 但经 $10\ \Omega$ 过渡电阻接地时, 测量阻抗故障后一直处于圆外, 保护拒动; 区外 85 km 处 A 相故障, 金属性接地时受到短路电流特性的影响, 会出现测量阻抗小于整定阻抗的情况, 造成保护误动, 但经 $10\ \Omega$ 过渡电阻接地时, 反而规避了短路电流对保护造成的误动影响, 测量阻抗值在故障期间均大于整定阻抗, 保护不会误动。

3.2 时域距离保护动作特性分析

由以上分析可知, 传统距离保护不适应于双馈风电场送出线的保护, 由第 2 节的分析可知, 基于参数辨识的时域距离保护, 不受短路电流特性的影响, 同时也可解决过渡电阻的问题。为验证时域距离保护在双馈风电场送出线的适应性, 同样以下分成三种情况进行分析, 以过渡电阻分别为 $0\ \Omega$ 、 $10\ \Omega$ 、 $30\ \Omega$ 为例, 分析风电场送出线 5 km、45 km、75 km、85 km 发生 A 相接地故障时, 基于参数识别的时域距离保护动作情况, 其动作情况如表 2 所示。

表 2 时域距离保护动作情况

Table 2 Operation of time domain distance protection

故障点	过渡电阻/ Ω	计及 Crowbar 动作	计及 RSC 控制
5 km (首端)	0	动作	动作
	10	动作	动作
	30	动作	动作
	100	动作	动作
45 km (区内)	0	动作	动作
	10	动作	动作
	30	动作	动作
	100	动作	动作
75 km (区内远端)	0	动作	动作
	10	动作	动作
	30	动作	动作
	100	动作	动作
85 km (区外近端)	0	不动作	不动作
	10	不动作	不动作
	30	不动作	不动作
	100	不动作	不动作

由表 2 可知，风电场送出线不同点发生故障时，两种运行工况下时域距离保护均能正确区分区内外故障。基于最小二乘法的参数辨识得到的线路电阻、电抗以及过渡电阻的结果如表 3 所示，基于参数辨识结果的时域距离保护动作的仿真结果如图 8—图 10 所示。

由表 3 可知，参数辨识得到的结果与实际值之间相对误差非常小，以线路 45 km 处金属性接地考虑 Crowbar 保护动作的情况为例，线路 45 km 处故障时，线路的测量电阻、电抗理论值分别为 5.188 Ω 、14.836 Ω ，过渡电阻理论值为 0 Ω ，参数辨识的电阻约为 5.185 8 Ω 、电抗约为 14.822 5 Ω 、过渡电阻约为 0.006 9 Ω ，辨识的电阻、电抗与理论值相比，其相对误差非常小，分别为 0.042%、0.091%，由于过渡电阻理论值为 0 Ω ，因此不宜计算其相对误差，其绝对误差为 0.006 9。由以上分析可知，基于最小二乘的参数辨识法能准确辨识线路电阻、电抗和过渡电阻。

由图 8—图 10 可知，基于参数辨识的距离保护不受转速频率分量和暂态自然分量的影响，以图 8 为例，区内末端 75 km 处故障时，故障期间测量阻抗值一直处于整定阻抗圆内，保护能正确动作，区外近端 85 km 处故障时，故障期间测量阻抗均大于整定阻抗，保护不会误动。同样，经过渡电阻接地的故障时域距离保护也能正确动作，如图 9 所示，经 10 Ω 过渡电阻故障后，区内近端 45 km 和区内远端 75 km 处故障的测量阻抗均小于整定阻抗，区外近端 85 km 处故障时，测量阻抗大于整定阻抗，保护能够正确区分区内外故障。图 10 中过渡电阻为

30 Ω 时，时域距离保护仍能正确动作。

表 3 测量阻抗的理论值与辨识值的比较

Table 3 Comparison of theoretical and identified values of measured impedance

接地电阻	故障位置	测量阻抗理论值/ Ω	辨识阻抗/ Ω		辨识阻抗的相对误差	
			计及 Crowbar	计及 RSC	计及 Crowbar	计及 RSC
0 Ω	5 km	R_L	0.5774	0.5774	0.156%	0.156%
		X_L	1.6514	1.6517	0.176%	0.194%
		R_g	0.0001	-0.0002	—	—
	45 km	R_L	5.1858	5.1892	0.042%	0.023%
		X_L	14.8225	14.8377	0.091%	0.011%
		R_g	0.0069	-0.017	—	—
	75 km	R_L	8.6478	8.6587	0.002%	0.124%
		X_L	24.7231	24.7563	0.02%	0.114%
		R_g	-0.007	0	—	—
	85 km	R_L	9.8098	9.8166	0.1%	0.169%
		X_L	28.0385	28.0651	0.052%	0.147%
		R_g	-0.002	-0.005	—	—
10 Ω	5 km	R_L	0.5768	0.5769	0.052%	0.069%
		X_L	1.6495	1.6469	0.061%	0.097%
		R_g	10.046	10.022	0.46%	0.22%
	45 km	R_L	5.1875	5.1906	0.009%	0.05%
		X_L	14.828	14.8417	0.054%	0.241%
		R_g	9.966	9.974	0.34%	0.26%
	75 km	R_L	8.6435	8.6495	0.052%	0.017%
		X_L	24.6675	24.7334	0.245%	0.022%
		R_g	10.096	10.081	0.96%	0.81%
	85 km	R_L	9.778	9.7947	0.224%	0.054%
		X_L	27.963	28.0072	0.218%	0.06%
		R_g	10.175	10.132	1.75%	1.32%
30 Ω	5 km	R_L	0.5761	0.5759	0.069%	0.104%
		X_L	1.6462	1.6470	0.139%	0.091%
		R_g	29.899	29.910	0.337%	0.3%
	45 km	R_L	5.1889	5.1887	0.017%	0.013%
		X_L	14.8328	14.8367	0.022%	0.005%
		R_g	30.032	30.027	0.107%	0.09%
	75 km	R_L	8.6267	8.6257	0.246%	0.257%
		X_L	24.6659	24.6714	0.251%	0.223%
		R_g	30.016	29.933	0.053%	0.223%
	85 km	R_L	9.7541	9.7576	0.468%	0.433%
		X_L	27.8876	27.9028	0.487%	0.432%
		R_g	30.102	30.077	0.34%	0.26%
100 Ω	5 km	R_L	0.5684	0.5669	1.405%	1.665%
		X_L	1.6269	1.6270	1.310%	1.304%
		R_g	100.21	100.27	0.21%	0.27%
	45 km	R_L	5.1601	5.1647	0.538%	0.449%
		X_L	14.731	14.7804	0.708%	0.375%
		R_g	99.942	99.96	0.058%	0.04%
	75 km	R_L	8.5491	8.5853	1.14%	0.725%
		X_L	24.376	24.530	1.42%	0.801%
		R_g	100.165	100.23	0.165%	0.23%
	85 km	R_L	9.615	9.6972	1.88%	1.05%
		X_L	27.5188	27.6872	1.803%	1.20%
		R_g	100.27	100.38	0.27%	0.38%

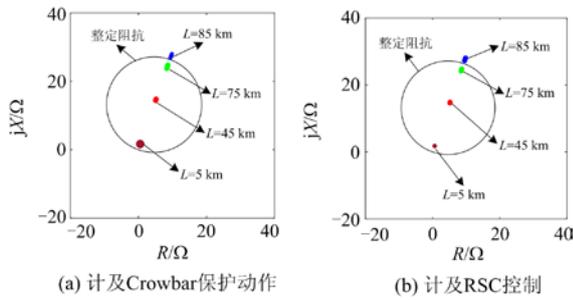


图 8 风电场送出线 A 相金属性接地故障时域距离保护动作特性

Fig. 8 Time domain distance protection action characteristics of phase A metallic grounding fault in wind farm outlet line

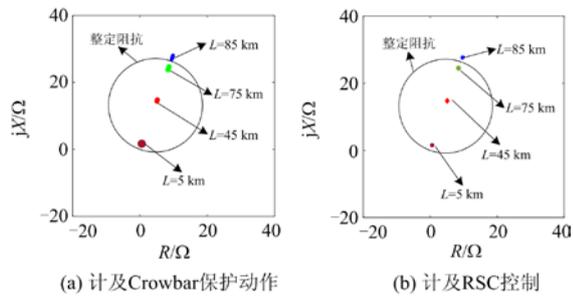


图 9 风电场送出线 A 相经 10 Ω 过渡电阻接地故障时域距离保护动作特性

Fig. 9 Time-domain distance protection operation characteristics of phase A grounding fault with 10 Ω transition resistance in wind farm transmission line

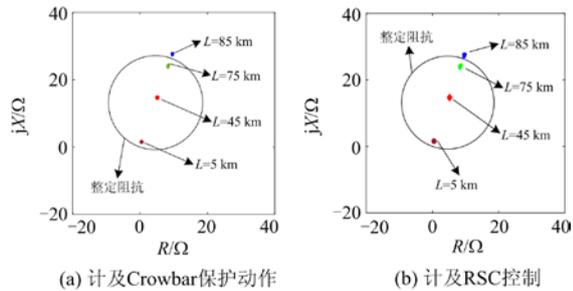


图 10 风电场送出线 A 相经 30 Ω 过渡电阻接地故障时域距离保护动作特性

Fig. 10 Time domain distance protection operation characteristics of A phase grounding fault with 30 Ω transition resistance on wind farm outlet line

4 结论

本文分析了双馈风电场送出线发生不对称故障后, 计及 Crowbar 保护动作和 RSC 控制两种运行工况下, DFIG 的短路电流特性及其对傅里叶算法提取基频分量的影响, 进而分析了短路电流特性对传

统距离保护和时域距离保护的影响, 仿真分析了风电场送出线发生单相接地故障时, 传统距离保护和时域距离保护的動作特性, 得到了以下结论。

(1) 双馈风电系统发生不对称故障时, 计及 Crowbar 保护动作时含有的转速频率分量、计及 RSC 控制时含有的暂态自然分量都会造成离散傅里叶算法不能准确提取电流的基频分量, 接地电阻的存在使得测量电压不再是故障点到保护安装处的线路压降。

(2) 仿真分析了风电场送出线经不同过渡电阻的接地故障, 计及 Crowbar 保护和 RSC 控制两种运行工况下, 传统距离保护和时域距离保护的動作特性, 结果表明两种运行工况下的不对称短路电流都会导致传统距离保护不能正确动作, 过渡电阻的存在也会导致传统距离保护不能正确动作, 但时域距离保护不受 DFIG 短路电流特性的影响, 在不同运行工况下, 经不同过渡电阻接地时时域距离保护都能正确动作。

参考文献

- [1] BOUBZIZI S, ABID H, EL HAJJAJI A, et al. Comparative study of three types of controllers for DFIG in wind energy conversion system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 214-225. DOI: 10.1186/s41601-018-0096-y.
- [2] 丁剑, 王震宇, 焦瑞浩, 等. 清洁能源并网下多电源联合运行的策略研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(19): 72-77, 85. DING Jian, WANG Zhenyu, JIAO Ruihao, et al. Research on strategies of multi-power joint operation generators with clean energy connected to transmission network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(19): 72-77, 85.
- [3] 冯磊, 杨淑连, 徐达, 等. 考虑风电输出功率波动性的混合储能容量多级优化配置[J]. 热力发电, 2019, 48(10): 44-50. FENG Lei, YANG Shulian, XU Da, et al. Multistage optimal capacity configuration of hybrid energy storage considering wind power fluctuation[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(10): 44-50.
- [4] 季宇, 吴鸣, 刘海涛, 等. 不同类型风电机组对系统短路容量的影响[J]. 电测与仪表, 2019, 56(22): 72-78. JI Yu, WU Ming, LIU Haitao, et al. Influence of different wind turbines on short circuit capacity of system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(22): 72-78.

- [5] 周步祥, 董申, 林楠, 等. 计及撬棒电路的双馈风电机组二次骤升故障穿越特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 152-159.
ZHOU Buxiang, DONG Shen, LIN Nan, et al. Analysis of double-fed wind turbine's secondary high voltage ride-through characteristics considering the crowbar circuit[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 152-159.
- [6] 韩斌, 王忠杰, 赵勇, 等. 智慧风电场发展现状及规划建议[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 34-39.
HAN Bin, WANG Zhongjie, ZHAO Yong, et al. Development status and planning suggestions of smart wind farms[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 34-39.
- [7] NOURELDEEN O, HAMDAN I. Design of robust intelligent protection technique for large-scale grid-connected wind farm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 169-182. DOI: 10.1186/s41601-018-0090-4.
- [8] 曹慧秋, 徐箭, 洪敏, 等. 基于通用分布的风电功率出力动态场景生成方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(24): 6-10.
CAO Huiqiu, XU Jian, HONG Min, et al. A method of dynamic scenarios generation of wind power output based on versatile distribution[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(24): 6-10.
- [9] 穆钢, 蔡婷婷, 严干贵, 等. 双馈风电机组参与持续调频的双向功率约束及其影响[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1750-1759.
MU Gang, CAI Tingting, YAN Gangui, et al. Bidirectional power constraints and influence of doubly fed induction generator participating in continuous frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1750-1759.
- [10] 欧阳金鑫, 熊小伏. 计及转子励磁控制的双馈感应发电机短路电流研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6083-6092.
OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu. Research on short-circuit current of doubly-fed induction generators under rotor excitation control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6083-6092.
- [11] 王晨清, 宋国兵, 汤海雁, 等. 距离保护在风电接入系统中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 10-15.
WANG Chenqing, SONG Guobing, TANG Haiyan, et al. Adaptability analysis of distance protection in power system integration with wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 10-15.
- [12] 范小红, 孙士云, 孙德娟, 等. 双馈风机三相短路电流特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 38-48.
FAN Xiaohong, SUN Shiyun, SUN Dejuan, et al. Analysis of three-phase short-circuit current characteristics of doubly fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 38-48.
- [13] LOPEZ J, GUBIA E, SANCHIS P, et al. Wind turbines based on doubly fed induction generator under asymmetrical voltage[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 321-330.
- [14] 肖繁, 张哲, 赖清华, 等. 双馈型电源短路电流统一解析方法及特性分析研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3319-3331.
XIAO Fan, ZHANG Zhe, LAI Qinghua, et al. Study on unified analysis method and characteristics in fault currents of doubly-fed induction generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3319-3331.
- [15] 焦在强. 大规模风电接入的继电保护问题综述[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 195-201.
JIAO Zaiqiang. A survey on relay protection for grid-connection of large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 195-201.
- [16] 王燕萍. 双馈风电机组暂态特性及对配网保护的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
WANG Yanping. Research on transient characteristics of wind power generation with doubly fed induction generator and the influence on protection of distribution network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [17] 王耀函, 刘辉, 刘吉臻, 等. 考虑撬棒保护和残压的DFIG 短路电流实用计算方法及应用[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 134-138.
WANG Yaohan, LIU Hui, LIU Jizhen, et al. Transient current analysis method of DFIG voltage dip based on crowbar protection[J]. Electric Power, 2014, 47(4): 134-138.
- [18] 李菁. 电网故障下双馈感应风力发电机暂态特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
LI Jing. Transient characteristics research of DFIG wind turbine under power grid failure[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [19] 丁秀香. 双馈风力发电系统故障特性及保护策略研究

- [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
DING Xiuxiang. Research on fault characteristic and protection strategy of wind power generation with doubly fed induction generator[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [20] 郑涛, 魏旭辉, 李娟, 等. PI 控制参数对双馈风电机组短路电流特性的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 15-21.
ZHENG Tao, WEI Xuhui, LI Juan, et al. Influence of PI control parameters on short circuit current characteristics of DFIG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 15-21.
- [21] 欧阳金鑫. 变速恒频风电机组并网故障机理与分析模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
OUYANG Jinxin. Studies on fault characteristics and analytical models of integrated variable-speed constant-frequency wind power generator[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [22] 黄维芳, 李钦豪, 文安. 风电场低电压穿越对零序电流保护的影响[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 91-94.
HUANG Weifang, LI Qin hao, WEN An. Influence of low voltage ride-through of wind farm on zero-sequence current protection[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 91-94.
- [23] 沈金青, 黄宏盛, 黄涛. 基于风机弱馈特性的集电线路故障方向判断[J]. 可再生能源, 2018, 36(8): 1192-1196.
SHEN Jinqing, HUANG Hongsheng, HUANG Tao. A novel fault direction recognition method in collector line based on weak-infeed property of wind turbines[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(8): 1192-1196.
- [24] 杨欢红, 李庆博, 寇柯, 等. 双馈风电场的频率特性对距离保护的影响[J]. 高压电器, 2016, 52(9): 116-120.
YANG Huanhong, LI Qingbo, KOU Ke, et al. Impact of frequency characteristics in wind farms based on doubly-fed induction generators wind farm on distance protection[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9): 116-120.
- [25] 余嘉彦, 袁越, 周建华, 等. 风电场运行参数变化对其出口输电线路距离保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 64-69.
YU Jiayan, YUAN Yue, ZHOU Jianhua, et al. Impact of the changes of operation parameters of wind farm on distance protection of output transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 64-69.
- [26] 王婷, 李凤婷, 何世恩. 影响风电场联络线距离保护的因 素及解决措施[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1420-1424.
WANG Ting, LI Fengting, HE Shi'en. Factors impacting distance protection for tie line of wind farm and corresponding countermeasures[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1420-1424.
- [27] 侯俊杰, 樊艳芳, 钟显, 等. 适应于风电接入系统的抗高阻接地时域方程距离保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 122-128.
HOU Junjie, FAN Yanfang, ZHONG Xian, et al. Research on high resistance grounding time domain equation based distance protection for wind power accessed power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 122-128.
- [28] 束洪春. 电力工程信号处理应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [29] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2009.

收稿日期: 2020-01-06; 修回日期: 2020-07-11

作者简介:

范小红(1994—), 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: 1240201076@qq.com

孙士云(1981—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: 422416503@qq.com

(编辑 许威)