

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190594

# 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

范小红, 孙士云, 张雪娟, 郑新宇, 王杨, 赵伟

(昆明理工大学, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 目前双馈风机短路电流特性对风电场送出线距离保护的影响以及相关的研究, 一般是在计及 Crowbar 保护动作后的基础上进行的, 少有考虑到计及转子侧变流器(RSC)控制后的 DFIG 短路电流特性对距离保护的影响。基于此, 分析了计及 Crowbar 保护动作后和计及 RSC 控制两种运行工况下双馈风机的短路电流特性之间的差异。在此基础上, 解析推导了计及 Crowbar 保护动作时的转速频率分量、计及 RSC 控制时的暂态自然分量对全周傅里叶算法产生的计算偏差表达式。进而分析双馈风电场提供的短路电流对传统距离保护的影响, 并提出了故障后适用于两种运行工况下的时域距离保护。最后在 Matlab/Simulink 平台上搭建并网双馈风机电磁暂态仿真模型。仿真分析了计及 Crowbar 保护动作和计及 RSC 控制两种情况下, 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; Crowbar 保护; RSC 控制; 传统距离保护; 时域距离保护

## Study on the influence of short-circuit current characteristics of a doubly-fed wind farm on distance protection and protection strategy

FAN Xiaohong, SUN Shiyun, ZHANG Xuejuan, ZHENG Xinyu, WANG Yang, ZHAO Wei

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

**Abstract:** At present, studies on the influence of short-circuit current characteristics of a doubly fed induction generator on distance protection of wind farm feeder lines and related research are generally carried out on the basis of taking Crowbar protection action into account. There is little literature considering the influence of short-circuit current characteristics of DFIG on distance protection under the control of Rotor-Side Converter (RSC). Thus this paper analyses the difference of short-circuit current characteristics of doubly fed induction generator considering Crowbar protection operation and RSC control operation. The expressions of calculation deviation of the speed-frequency component and transient natural component for full-cycle Fourier algorithm considering Crowbar protection operation and RSC control are deduced and analyzed. The purpose is to analyze the influence of short-circuit current from doubly-fed wind farm on traditional distance protection. Also a time-domain distance protection method adapted to two operating conditions after fault is proposed. Finally, the electromagnetic transient simulation model of grid-connected doubly fed induction generator is built on the platform of Matlab/Simulink. The operational characteristics of traditional distance protection and time-domain distance protection are simulated and analyzed considering Crowbar protection action and RSC control.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51367009).

**Key words:** doubly fed induction generator; Crowbar protection; RSC control; traditional distance protection; time-domain distance protection

## 0 引言

风能作为可持续、无污染的绿色能源, 近年来

得到了广泛的应用, 双馈风机(DFIG)因具有变速调频、变流器容量小、可四象限运行等优点成为目前的主流机型<sup>[1-5]</sup>。双馈风机定子侧直接与电网相连, 转子侧通过变流器与电网相连, 由于双馈风机的并网方式和运行方式, 其提供的短路电流与传统电机

相比存在显著差异,但目前风电场送出线路的保护仍按常规输电线路保护配置,并未考虑风电场提供的短路电流与传统电源区别,因此,研究双馈风电机组提供的短路电流特性,分析其对传统线路保护的影响显得尤为重要<sup>[6-8]</sup>。

目前已有大量学者在风电机组短路电流特性、风电场线路保护的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[9-11]分析了计及 Crowbar 保护动作的短路电流特性,推导了计及 Crowbar 保护的短路电流解析式,结果表明计及 Crowbar 保护的短路电流中除基频分量和暂态直流分量外,还含有衰减的转速频率分量;文献[12-14]分析并推导了计及转子侧变流器(RSC)控制的双馈风机短路电流,研究结果表明计及 RSC 控制的 DFIG 短路电流包含基频分量、暂态直流分量以及暂态自然分量。文献[15]分析了计及 Crowbar 保护动作后双馈风电场提供的短路电流频偏特性对距离保护的影响,指出了频偏特性使得基于工频傅氏算法的传统距离保护不能正确动作;文献[16-17]指出具备低压穿越能力的双馈式风电场送出线发生三相故障时, Crowbar 保护动作,短接转子侧变流器,定子绕组会感应转速频率分量的电流,该分量的电流频率取决于故障前转子转速,一般在 35~65 Hz 之间变化,而风电场侧电压主要由电网电压支撑,风电场侧电流、电压频率不同,致使不同频率的电压、电流相位、比值的比较不再准确,使得风电场侧方向元件、距离元件无法保证正确动作;文献[18]表明了不同的控制策略下产生的短路电流特性具有较大差异,会对继电保护造成较大影响。文献[19-21]理论分析了计及 Crowbar 保护动作后,短路电流非工频分量对传统距离保护的影响,提出了适用于风电场联络线距离保护的自适应整定方案,其中文献[19]分析了双馈风电并网联络线故障时故障电压电流的频率成分,结合短路电流中的固有频率与特征频率,提出了一种适用于双馈风电并网联络线的自适应距离保护;文献[20]研究了风电场运行参数对测量阻抗的影响,结合风电运行特点,提出风电场联络线自适应距离保护方案;文献[21]研究了风电场故障特性对继电保护的影响,针对双馈风机投入撬棒电阻后正序阻抗和负序阻抗不相等的特征,分析了传统接地距离保护 I、II、III 段在保护安装处测量到的阻抗与实际阻抗的异同,提出了考虑双馈风机特性的自适应接地距离保护 II 段的整定方法。文献[22]分析了双馈风电接入系统后,产生的频偏特性、高次谐波使传统工频量距离保护不能正确动作,提出了一种适用于风电场送出线抗高阻接地的时域

距离保护方案;文献[23]基于等传变理论,提出了适用于计及 Crowbar 保护动作的双馈风电场送出线的快速距离保护算法。

以上文献在研究双馈风机短路电流特性中,考虑了计及 RSC 变流器控制和计及 Crowbar 保护动作两种运行状态,但在分析双馈风机短路电流特性对传统距离保护影响,以及提出的适用于风电场送出线距离保护的方案中,均是在计及 Crowbar 保护动作后的基础上进行分析的。然而实际工程中,在非深度电压跌落时,短路电流并不足以触发 Crowbar 保护动作,且 Crowbar 保护也存在拒动的情况<sup>[13]</sup>。目前,少有文献研究计及 RSC 控制的短路电流特性中暂态自然分量对传统距离保护动作特性的影响并提出相适应的保护策略。本文首先分析了计及 RSC 控制和计及 Crowbar 保护动作两种情况下双馈风机短路电流特性,进而分别研究这两种短路电流特性对傅氏算法的影响,解析推导了暂态自然分量、转速频率分量各对傅里叶算法产生的计算偏差的表达式,基于此,提出了不受频率影响的时域距离保护方法,分析了时域距离保护在风电场送出线的适应性。最后,在 Matlab/Simulink 平台上建立 DFIG 电磁暂态仿真模型,仿真分析了计及 RSC 控制和计及 Crowbar 保护动作两种运行工况下,基于傅里叶算法和基于时域算法得到的测量阻抗波形,以及传统距离保护和时域距离保护的動作情况。

## 1 双馈风电机组短路电流特性对傅里叶算法的影响

双馈式风电机组的实质是绕线式感应发电机,其最大的特点是除定子侧直接与电网相连,转子侧也通过变流器与电网相连,当转子转速大于同步速时,双馈风电机组通过双 PWM 变流器向电网输送功率,当转子转速小于同步速时,电网通过双 PWM 变流器给电机转子提供转差频率的交流励磁电流。系统发生故障后,存在两种运行工况,分别为计及 RSC 控制和计及 Crowbar 保护动作,这两种运行状态下,双馈风电机组提供的短路电流特性都与传统电源存在显著差异。

### 1.1 计及 Crowbar 保护动作

当系统发生故障,转子侧短路电流过大,触发 Crowbar 保护动作,闭锁转子侧变流器时,双馈风机相当于普通的异步发电机,根据磁链守恒原理可知,故障瞬间定、转子磁链不发生突变,由于定子磁链不发生突变,则定子绕组电流中将感应出直流分量,该直流分量一般以定子时间常数衰减;又因为转子磁链不发生突变,且转子绕组仍以转速  $\omega_r$  旋

转, 因此定子绕组电流中会感应出转速频率分量, 该转速频率分量以转子时间衰减常数衰减。故双馈风机三相短路电流解析式可表示为<sup>[16]</sup>

$$i_c = A_c \sin(\omega_1 t + \varphi_c) + B_c e^{-\tau_{sc} t} \sin \varphi_c + C_c e^{-\tau_{rc} t} \sin(\omega_1 t + \varphi_c) \quad (1)$$

式中:  $\varphi_c$  为撬棒保护动作后短路电流的初相角;  $A_c$ 、 $B_c$ 、 $C_c$  为计及 Crowbar 保护动作时短路电流各分量系数(具体见附录 A), 其大小与电机参数以及机端电压跌落程度相关;  $\omega_1$  为同步转速;  $\omega_r$  为转子转速;  $\tau_{sc}$ 、 $\tau_{rc}$  分别为计及 Crowbar 保护动作的定子和转子时间衰减常数。

由式(1)可知, 双馈风电机组提供的短路电流除基频分量和暂态直流分量外, 还含有衰减转速频率含量, 目前双馈风电机组转子转速一般在 0.7~1.3 p.u. 之间, 故短路电流中衰减的转速频率分

$$\Delta I_{\cos_c} = C_c \left( e^{\frac{T}{2}\tau_{rc}} - e^{\frac{T}{2}\tau_{rc}} \right) \cdot \frac{[\cos(\lambda\pi)(\lambda+1)\omega_1 + \tau_{rc} \sin(\lambda\pi)][\omega_1^2(\lambda^2+1) + \tau_{rc}^2]}{[(\lambda-1)^2\omega_1^2 + \tau_{rc}^2][(\lambda+1)^2\omega_1^2 + \tau_{rc}^2]};$$

$$\Delta I_{\sin_c} = 4\pi C_c e^{-\frac{T}{2}\tau_{rc}} \cdot \frac{4\pi^2 \sin(\lambda\pi)(1 + e^{T\tau_{rc}}) + T^2(\sin(\lambda\pi)(\tau_{rc}^2 - \omega_r^2)(1 + e^{T\tau_{rc}}) + 2\tau_{rc}\omega_r \cos(\lambda\pi)(1 - e^{T\tau_{rc}}))}{T^4(\tau_{rc}^2 + \omega_r^2) + 8\pi^2 T^2(\tau_{rc}^2 - \omega_r^2) + 16\pi^4};$$

$T$  为傅里叶算法的周期时间。

经傅里叶后电流基频分量幅值和相角分别为

$$\begin{cases} |I_c| = \sqrt{I_{\cos_c}^2 + I_{\sin_c}^2} = I_{c1} + \Delta I_c \\ \angle |I_c| = \arctan\left(\frac{I_{\cos_c}}{I_{\sin_c}}\right) = \angle \varphi_c + \angle \Delta \varphi_c \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $I_{c1} = A_c$ ;

$$\Delta I_c = \sqrt{A_c^2 + 2A_c(\Delta I_{\cos_c} \sin \varphi + \Delta I_{\sin_c} \cos \varphi) + (\Delta I_{\cos_c}^2 + \Delta I_{\sin_c}^2)} - A_c;$$

$$\angle \Delta \varphi_c = \arctan\left(\frac{A_c \sin \varphi_c + \Delta I_{\cos_c}}{A_c \cos \varphi_c + \Delta I_{\sin_c}}\right) - \angle \varphi_c。$$

以上结果是运用连续函数的傅氏公式推导求得的, 它对离散信号也同样适用<sup>[7]</sup>。由式(4)可知, 计及 Crowbar 保护动作的 DFIG 短路电流中, 由于转速频率, 使得傅里叶算法不能准确地提取短路电流基频分量的幅值和相角。

## 1.2 计及 RSC 变流器控制

系统发生故障后, DFIG 转子短路电流不能触发 Crowbar 保护动作或 Crowbar 保护拒动时, 转子侧变流器会做出快速反应, 通过改变励磁电流, 从而减小定、转子短路电流。计及转子侧变流器的调节作用的 DFIG 短路电流波形复杂, 可表示为<sup>[3]</sup>

$$i_{rsc} = A_{rsc} \sin(\omega_1 t + \varphi_{rsc}) + B_{rsc} e^{-\tau_s t} \sin \varphi_{rsc} + C_{rsc} (\alpha_2 e^{\alpha_1 t} - \alpha_1 e^{\alpha_2 t}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{rsc}) \quad (5)$$

量的频率一般在 35~65 Hz 之间变化。

短路电流经傅里叶计算前, 会先通过差分滤波处理, 将短路电流中衰减直流分量滤除。故实际上经傅里叶计算的短路电流只含有基频分量和衰减的转速频率分量, 即

$$i'_c = A_c \sin(\omega_1 t + \varphi_c) + C_c e^{-\tau_{rc} t} \sin(\omega_1 t + \varphi_c) \quad (2)$$

为分析傅里叶算法提取基频相量时, 转速频率分量对提取结果的影响, 将式(2)代入全波傅里叶算法中, 可得到短路电流经傅里叶算法后, 电流基频相量的余弦系数和正弦系数分别为

$$\begin{cases} I_{\cos_c} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i'_c \cos(\omega_1 t) dt = A_c \sin \varphi_c + \Delta I_{\cos_c} \\ I_{\sin_c} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i'_c \sin(\omega_1 t) dt = A_c \cos \varphi_c + \Delta I_{\sin_c} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\lambda = \frac{\omega_r}{\omega_1}$ ;

式中:  $\varphi_{rsc}$  为考虑 RSC 控制的短路电流初相角;  $A_{rsc}$ 、 $B_{rsc}$ 、 $C_{rsc}$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  的值与电机参数、机端电压跌落程度、PI 控制参数相关(具体见附录 B);  $\tau_s$  为计及 RSC 控制的定子时间衰减常数。

由式(5)可知, 与计及撬棒保护动作的短路电流相比, 该故障过程同样含有基频分量和暂态直流分量, 但不再含有转速频率分量, 而是含有暂态自然分量, 该分量频率与同步频率相同, 其衰减速度与电机参数以及变流器 PI 控制参数有关。

同样对短路电流作差分滤波处理, 滤除暂态直流分量后的短路电流可表示为

$$i'_{rsc} = A_{rsc} \sin(\omega_1 t + \varphi_{rsc}) + C_{rsc} (\alpha_2 e^{\alpha_1 t} - \alpha_1 e^{\alpha_2 t}) \sin(\omega_1 t + \varphi_{rsc}) \quad (6)$$

将式(6)代入全波傅里叶算法中, 可得到短路电流经傅里叶算法后, 电流基频相量的余弦系数和正弦系数分别为

$$\begin{cases} I_{\cos_{rsc}} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i'_{rsc} \cos(\omega_1 t) dt = A_{rsc} \sin \varphi_{rsc} + \Delta I_{c_{rsc}} \\ I_{\sin_{rsc}} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i'_{rsc} \sin(\omega_1 t) dt = A_{rsc} \cos \varphi_{rsc} + \Delta I_{s_{rsc}} \end{cases} \quad (7)$$

式中:

$$\Delta I_{c\_rsc} = 4\pi C_{rsc} \left[ \frac{\alpha_2 (e^{\frac{T}{2}\alpha_1} - e^{-\frac{T}{2}\alpha_1})}{T^2 \alpha_1^2 + 16\pi^2} - \frac{\alpha_1 (e^{\frac{T}{2}\alpha_2} - e^{-\frac{T}{2}\alpha_2})}{T^2 \alpha_2^2 + 16\pi^2} \right],$$

$$\Delta I_{s\_rsc} = 8\pi^2 C_{rsc} \left[ \frac{\alpha_2 (e^{\frac{T}{2}\alpha_1} - e^{-\frac{T}{2}\alpha_1})}{\alpha_1 T (T^2 \alpha_1^2 + 16\pi^2)} - \frac{\alpha_1 (e^{\frac{T}{2}\alpha_2} - e^{-\frac{T}{2}\alpha_2})}{\alpha_2 T (T^2 \alpha_2^2 + 16\pi^2)} \right].$$

根据式(7)可得经傅里叶变换后 DFIG 短路电流的基频分量幅值和相角分别为

$$\begin{cases} |I_{rsc}| = \sqrt{I_{\cos\_rsc}^2 + I_{\sin\_rsc}^2} = I_{rsc1} + \Delta I_{rsc} \\ \angle |I_{rsc}| = \arctan\left(\frac{I_{\cos\_rsc}}{I_{\sin\_rsc}}\right) = \angle \varphi_{rsc} + \angle \Delta \varphi_{rsc} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $I_{rsc1} = A_{rsc}$ ;

$$\Delta I_{rsc} = \sqrt{A_{rsc}^2 + 2A_{rsc}(\Delta I_{c\_rsc} \sin \varphi_{rsc} + \Delta I_{s\_rsc} \cos \varphi_{rsc}) + (\Delta I_{c\_rsc}^2 + \Delta I_{s\_rsc}^2)} - A_{rsc};$$

$$\angle \Delta \varphi_{rsc} = \arctan\left(\frac{A_{rsc} \sin \varphi_{rsc} + \Delta I_{c\_rsc}}{A_{rsc} \cos \varphi_{rsc} + \Delta I_{s\_rsc}}\right) - \angle \varphi_{rsc}.$$

由式(8)可知, 计及 RSC 控制的短路电流中暂态自然分量的存在, 将使得傅里叶算法也不能准确提取短路电流基频分量的幅值和相角。

## 2 传统距离保护和时域距离保护在风电场送出线上的适应性分析

### 2.1 传统距离保护

传统距离保护是通过准确提取故障暂态过程中保护安装处的测量电压、电流的工频分量, 根据所测得的电压、电流工频分量得到保护安装处到故障点之间的阻抗, 将该测量阻抗与整定阻抗值进行比较, 由此来判断区内外故障。

保护安装处测量阻抗的表达式为<sup>[24]</sup>

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

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。

当风电场发生三相故障情况时, 风电场侧电压均由系统支撑, 故风电场侧电压仍为工频, 但电流频率由风机提供, 根据第一节的分析可知, 风机在两种运行工况下, 短路电流的故障分量均与传统电流不一样, 计及 RSC 控制时短路电流中含有暂态直流分量, 计及 Crowbar 保护动作时含有衰减转速频率分量。

将式(4)和式(8)分别代入式(9)中, 可以得到计及 Crowbar 保护动作和计及 RSC 控制两种运行状态下, 风电场送出线保护安装处测量阻抗误差的解析式为

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

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

对于接地保护, 测量电压为保护安装处相对地电压, 测量电流为带有零序电流补偿的故障相电流; 对于相间短路, 为保护安装处两故障相的电压差, 测量电流为两故障相的电流差。测量电流是根据流过保护安装处的暂态电流, 经傅里叶算法提取后得到的基频电流。由式(10)可知, 由于转速频率分量和暂态自然分量的存在, 使得基于傅里叶算法的传统距离保护得到的测量阻抗  $Z_m$  并不准确, 存在一个误差阻抗, 该误差阻抗的存在可能会造成保护的误动和拒动。

### 2.2 时域距离保护

由以上分析可知, 双馈风电场计及 Crowbar 保护动作和计及 RSC 控制的短路电流, 与传统电机提供的短路电流存在很大的差异, 且这种差异会导致基于傅里叶算法的传统距离保护不能正确动作。为解决风电场送出线发生故障时, 传统距离保护不能正确动作的问题, 提出适应于风电接入系统的时域距离保护。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, 可用式(11)表示。

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (11)$$

对时域方程(11)进行离散化处理, 采用差分代替微分的方法, 将式(11)转化为

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{i(t) - i(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (12)$$

根据线路上实时的电压、电流值, 运用递推最小二乘法得到保护安装处实时的阻抗  $Z_m$ , 再将所测量阻抗  $Z_m$  与整定阻抗  $Z_{set}$  进行比较, 实现距离保护的判据为

$$Z_m < Z_{set} \quad (13)$$

当式(13)成立, 即测量阻抗小于整定阻抗时, 判定为区内故障, 保护动作; 反之, 则判定为区外故障, 保护不动作。时域距离保护在原理上规避了电流频率的影响, 理论上基于时域算法的距离保护适用于风电场送出线。

## 3 仿真实验及分析

为分析传统距离保护和时域距离保护在风电场

送出线上的适应性, 在 Matlab/Simulink 上建立图 1 所示的并网双馈风力发电机的电磁暂态仿真模型。风电场风机台数为 60, 每台风机输出的有功功率为 1.5 MW, 功率因数为 0.9, 额定电压为 575 V, 额定转速为 1.2 p.u., 风机经箱变(575 V/35 kV)连接在 35 kV 汇流母线上, 再经风电场主变(35 kV/110 kV), 通过 110 kV 风电场送出线将电能送入系统。送出线长度为 100 km, 不计电容的影响, 单位长度正序电阻、电感分别为  $0.1153 \Omega$ 、 $1.05 \text{ mH}$ , 零序电阻、电感分别为  $0.413 \Omega$ 、 $2.767 \text{ mH}$ 。风机具体参数见附录 C。

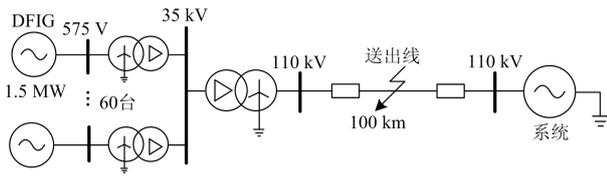


图 1 并网双馈风力发电机的电磁暂态仿真模型  
Fig. 1 Electromagnetic transient simulation model of grid-connected doubly fed induction generator

风电场送出线全长 100 km, 以距离保护 I 段作为研究对象, 设置保护范围为线路全长的 80%, 即理论上, 只要故障点距离保护安装处的距离小于 80 km, 则测量阻抗值应小于整定阻抗值, 保护动作; 反之, 则测量阻抗值应大于整定阻抗值, 保护不动作。以 1 s 时风电场送出线 40%、70%、85%处分别发生三相短路为例, 即故障点距保护安装处 40 km、70 km、85 km 处发生故障, 分析计及 Crowbar 保护动作和计及 RSC 动作的两种情况下, 送出线路传统距离保护和时域距离保护的動作特性。由于傅氏算法的动态特性, 实际上故障后 0~20 ms 对应的测量阻抗并不能反映短路的真实位置<sup>[18]</sup>, 故取故障后 20 ms 后的测量阻抗轨迹作为研究对象。

### 3.1 传统距离保护动作特性分析

#### 1) 计及 RSC 控制

风电场送出线发生三相短路时, 计及 RSC 控制的运行条件下, 传统距离保护的動作特性如图 2—图 4 所示。图中测量电抗、测量电阻是故障后根据保护安装处继电器感受到的电压、电流计算得到的; 图中实际电阻、实际电抗分别是线路的实际电阻值和电抗值; 整定阻抗是根据距离保护 I 段的整定值, 采用方向圆的動作特性得到的。

由图2(a)、图3(a)和图4(a)可知, 故障后计及 RSC 控制时, 双馈风电场提供的短路电流中含有的衰减基频分量, 会造成基于傅里叶算法得到的电阻、电感不准确, 出现波动现象, 从而造成距离保护不

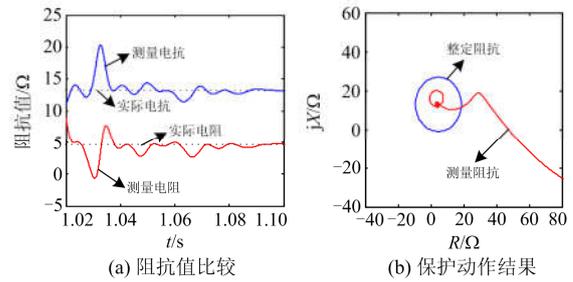


图 2 距保护安装处 40 km 处故障的阻抗值与保护动作结果(区内故障、RSC、传统)

Fig. 2 Impedance value of fault at 40 km distance from protection installation and result of protection action

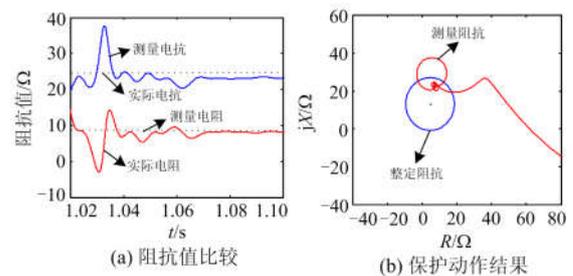


图 3 距保护安装处 70 km 处故障的阻抗值与保护动作结果(区内故障、RSC、传统)

Fig. 3 Impedance value of fault at 70 km distance from protection installation and result of protection action

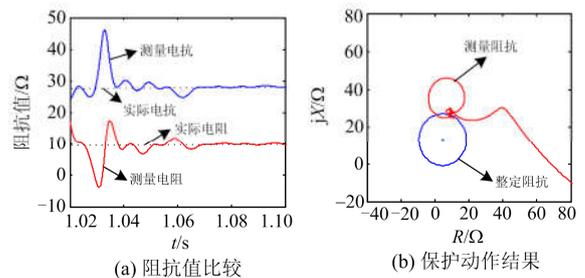


图 4 距保护安装处 85 km 处故障的阻抗值与保护动作结果(区外故障、RSC、传统)

Fig. 4 Impedance value of fault at 85 km distance from protection installation and result of protection action

能正确动作。图 2 和图 3 对风电场侧保护安装处而言均为区内故障, 由图 2 可知, 虽然测量得到的电阻在区间 $[-0.7, 7.7]$ 之间波动、电抗在 $[11.4, 20.4]$ 之间波动, 但其故障距离距保护安装处较近, 故障后测量阻抗均处于整定阻抗圆内, 因此保护能正确动作; 图 3 虽然也处于区内故障, 但由于其距保护安装处的距离较远, 故障后测量得到的电阻在 $[-3.05, 14.3]$ 之间波动, 电抗在 $[20.3, 37.7]$ 之间波动,

故障后得到的测量阻抗的值不完全处于圆内。结合图 3(b)和图 5 可知, 故障后 1.02~1.03 s 测量阻抗处于整定阻抗圆的圆内, 但 1.03~1.035 s 测量阻抗处于整定阻抗圆的圆外, 1.035 s 之后测量阻抗又再次处于整定阻抗圆的圆内, 测量阻抗这种反复的变化可能会导致断路器触点不稳定, 从而造成保护拒动, 同时也可能导致振荡闭锁。图 3 属于区外故障, 理论上其测量阻抗值应大于整定阻抗值, 但同样由于测量阻抗的不准确, 故障后电阻在 $[-3.8, 17.5]$ 之间波动, 电抗在 $[24.9, 46.1]$ 之间波动, 会出现测量阻抗值小于整定阻抗值的情况, 从而造成距离保护误动。

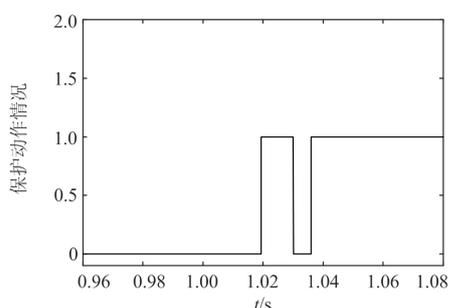


图 5 距保护安装处 70 km 处故障时保护动作情况(RSC)

Fig. 5 Protection action at 70 km away from protection installation

## 2) 计及 Crowbar 保护动作

风电场送出线发生三相短路时, 计及 Crowbar 保护动作的运行条件下, 传统距离保护的动作特性如图 6—图 8 所示。

由图 6(a)、图 7(a)和图 8(a)可知, 故障后计及 Crowbar 保护动作的传统距离保护动作情况和计及 RSC 控制的结果类似。计及 Crowbar 保护动作后, 受双馈风电场提供的短路电流中的转速频率分量影响, 傅里叶算法不能准确地提取短路电流基频分量, 使保护安装处得到的测量阻抗不准确, 造成距离保

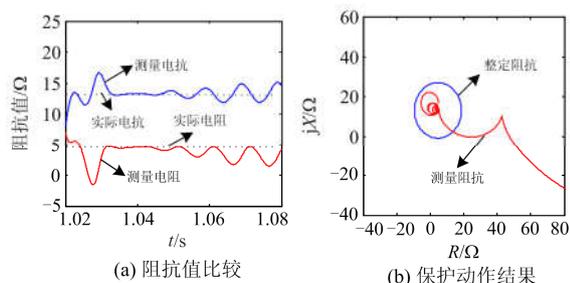


图 6 距保护安装处 40 km 处故障的阻抗值与保护动作结果(区内故障、Crowbar、传统)

Fig. 6 Impedance value of fault at 40 km distance from protection installation and result of protection action

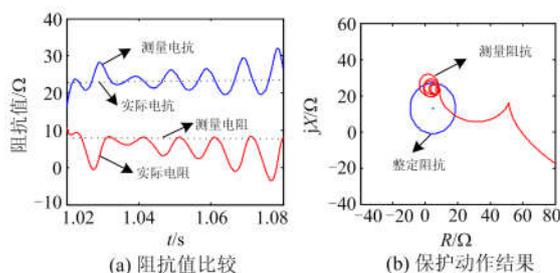


图 7 距保护安装处 70 km 处故障的阻抗值与保护动作结果(区内故障、Crowbar、传统)

Fig. 7 Impedance value of fault at 70 km distance from protection installation and result of protection action

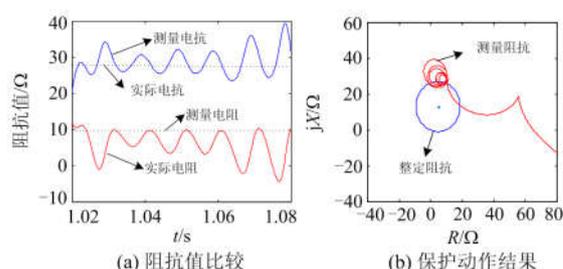


图 8 距保护安装处 85 km 处故障的阻抗值与保护动作结果(区外故障、Crowbar、传统)

Fig. 8 Impedance value of fault at 85 km distance from protection installation and result of protection action

护拒动和误动。由图 6(b)、图 7(b)和图 8(b)可知, 区内近端故障时, 保护能正确动作; 区内远端故障时, 测量阻抗与整定阻抗圆的比值结果如图 7(b)、图 9 所示。测量阻抗这种区内、区外反复的变化可能会造成保护拒动, 同时也可能导致振荡闭锁。保护出现拒动情况。区外故障时, 保护会出现误动情况。

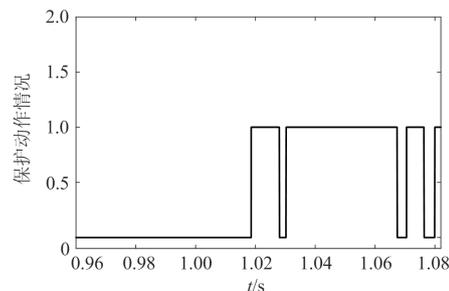


图 9 距保护安装处 70 km 处故障时保护动作情况(Crowbar)

Fig. 9 Protection action at 70 km away from protection installation

综上所述, 风电场送出线故障后, 计及 RSC 控制和计及 Crowbar 保护动作的两种运行状态下, 传统距离保护都不能正确动作。

## 3.2 时域距离保护动作特性分析

结合 2.2 节时域距离保护的原理, 以下分析计

及RSC控制和计及Crowbar保护动作两种运行工况下，时域距离保护的動作特性。

1) 计及 RSC 控制

故障后，不改变风机、线路参数，同样以风电场送出线 40%、70%、85%处分别发生三相短路为例，分析计及 RSC 控制的风电场送出线路时域距离保护的動作特性，仿真结果如图 10—图 12 所示。

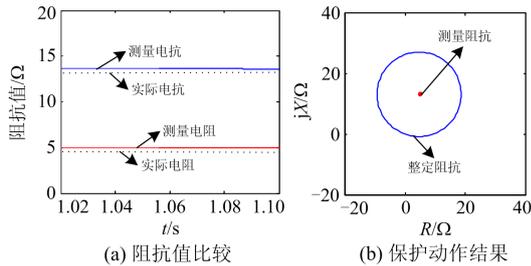


图 10 距保护安装处 40 km 处故障的阻抗值与保护动作结果(区内故障、RSC、时域)

Fig. 10 Impedance value of fault at 40 km distance from protection installation and result of protection action

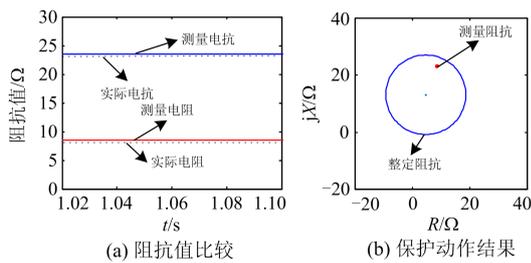


图 11 距保护安装处 70 km 处故障的阻抗值与保护动作结果(区内故障、RSC、时域)

Fig. 11 Impedance value of fault at 70 km distance from protection installation and result of protection action

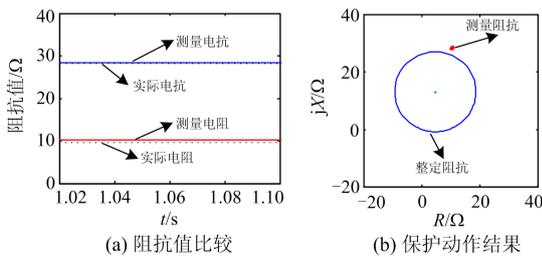


图 12 距保护安装处 85 km 处故障的阻抗值与保护动作结果(区外故障、RSC、时域)

Fig. 12 Impedance value of fault at 85 km distance from protection installation and result of protection action

由图 10—图 12 可知，基于时域算法的距离保护不受自然分量影响，通过时域距离保护得到测量电阻、电抗与实际电阻、电抗基本相等。当故障点在距保护安装处 40 km 时，实际电阻、电抗分别是

4.612 Ω、13.188 Ω，测量得到的电阻、电抗分别约为 4.638 Ω、13.20 Ω，测量电阻、电抗与实际电阻、电抗相比，误差分别为 0.56%和 0.091%；当故障点在距保护安装处 70 km 时，实际电阻、电抗分别是 8.071 Ω、23.079 Ω，测量得到的电阻、电抗分别约为 8.15 Ω、23.12 Ω，测量电阻、电抗与实际电阻、电抗相比，误差分别为 0.98%和 0.099%；当故障点在距保护安装处 85 km 时，处于区外故障时，实际电阻、电抗分别是 9.80 Ω、28.02 Ω，测量得到的电阻、电抗分别约为 9.923 Ω、28.11 Ω，测量电阻、电抗与实际电阻、电抗相比，误差分别为 1.25%和 0.32%。由以上分析可知，采用时域算法的距离保护，所得到的测量阻抗，不存在波动性，且测量值与实际值相比，误差较小，因此风电场故障后处于计及 RSC 控制的运行工况下，时域距离保护能正确区分风电场送出线路的区内外故障。

2) 计及 Crowbar 保护动作

为验证时域距离保护对不同种类双馈风机的适应性，改变双馈风机定、转子电阻和电感，将定、转子电阻分别改为 0.023 p.u.、0.016 p.u.，定、转子漏感分别改为 0.18 p.u.、0.16 p.u.，定转子互感改为 2.9 p.u.。保持其他参数不变的情况下，同样令风电场送出线 40%、70%、85%发生三相短路故障，分析计及 Crowbar 保护动作后时域距离保护動作特性，仿真结果如图 13—图 15 所示。

由图 13—图 15 可知，故障后，双馈风机在计及 Crowbar 保护动作的运行工况下，时域距离保护不受转速频率的影响，也能正确区分区内外故障。与计及 RSC 控制的情况类似，基于时域算法得到的测量电阻、电抗值与实际值之间的误差很小，区内、区外故障时，时域距离保护均能正确動作。

根据时域方程得到的测量电阻、电抗与实际电阻、电抗的对比结果如表 1 所示。

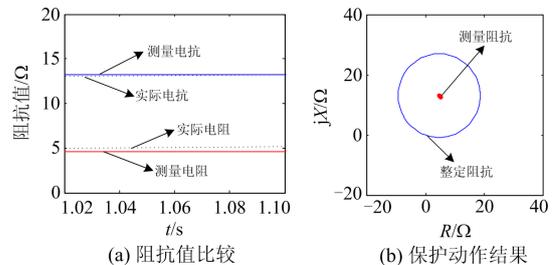


图 13 距保护安装处 40 km 处故障的阻抗值与保护动作结果(区内故障、Crowbar、时域)

Fig. 13 Impedance value of fault at 40 km distance from protection installation and result of protection action

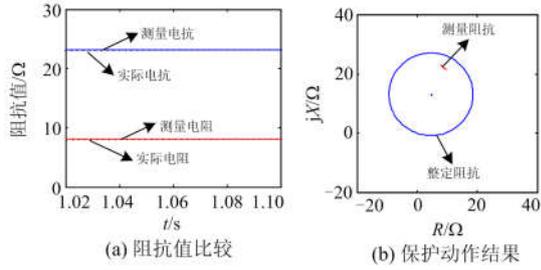


图 14 距保护安装处 70 km 处故障的阻抗值与保护动作结果(区内故障、Crowbar、时域)

Fig. 14 Impedance value of fault at 70 km distance from protection installation and result of protection action

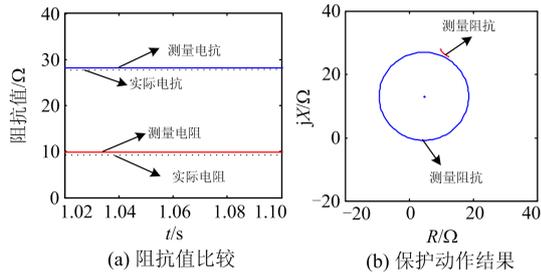


图 15 距保护安装处 85 km 处故障的阻抗值与保护动作结果(区外故障、Crowbar、时域)

Fig. 15 Impedance value of fault at 85 km distance from protection installation and result of protection action

表 1 实际阻抗与测量阻抗的对比结果

Table 1 Comparison between actual impedance and measured impedance

故障点	实际 阻抗/ Ω	测量阻抗/Ω		误差/%		
		计及 RSC	计及 Crowbar	计及 RSC	计及 Crowbar	
40%	R	4.612	4.638	4.643	0.56	0.67
	X	13.188	13.20	13.197	0.091	0.068
70%	R	8.071	8.15	8.147	0.98	0.94
	X	23.079	23.12	23.13	0.099	0.22
85%	R	9.80	9.923	9.921	1.25	1.2
	X	28.02	28.11	28.11	0.32	0.32

由表 1 可知, 故障后计及 RSC 控制和计及 Crowbar 保护动作两种运行工况下, 基于时域算法得到的测量阻抗与实际阻抗的误差都非常小, 且无波动性。

综上所述, 时域距离保护不受自然分量和频偏特性的影响, 在计及 RSC 控制和计及 Crowbar 保护动作的两种运行工况下, 时域距离保护均能正确动作。

## 4 结论

本文分析了双馈风机故障后计及 Crowbar 保护动作和计及 RSC 控制两种运行工况下, 双馈风机提供的短路电流特性, 推导了这两种情况下的短路电流经傅里叶算法后得到的基频电流幅值和相角的表达式, 进而分析了传统距离保护和时域距离的在风电场送出线上的动作特性, 得到以下结论:

1) 计及 Crowbar 保护动作的 DFIG 短路电流中的衰减转速频率分量, 以及计及 RSC 控制的 DFIG 短路电流中的暂态自然分量均会造成基于全波傅里叶算法提取的短路电流基频分量不再准确。

2) 仿真分析了计及 Crowbar 保护动作和计及 RSC 控制两种情况下, 基于傅里叶算法和基于时域算法的测量阻抗, 以及传统距离保护和时域距离保护的动作特性。结果表明, 这两种运行状态下, 基于傅里叶算法得到的测量阻抗分别受到转速频率分量和暂态自然分量的影响, 均会有波动性, 从而造成传统距离保护不能正确动作; 然而时域距离保护在这两种运行工况下, 测量得到的电阻和电抗与实际值非常接近, 说明时域距离保护不受转速频率分量和暂态自然分量的影响, 能正确区分区内外故障。

## 附录A

$$A_c = -(1-k)u_s \sqrt{\left(\frac{R_{rc}L_m^2 s}{L_D^2(\tau_{rc}^2 + s^2\omega_1^2)}\right)^2 + \left(\frac{R_{rc}L_m\tau_{rc}}{L_D^2\omega_1(\tau_{rc}^2 + s^2\omega_1^2)} - \frac{L_r}{L_D\omega_1}\right)^2}$$

$$B_c = \frac{R_{rc}L_m^2(\omega_1 - s\omega_1)ku_s}{L_D^2\omega_1[(\omega_1 - s\omega_1)^2 + (\tau_{rc} - \tau_{sc})^2]}$$

$$C_c = -\frac{R_{rc}L_m^2 u_s}{\omega_1 L_D^2} \sqrt{D_1^2 + D_2^2}$$

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

$$\tau_{sc} = R_s L_r / L_D$$

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

$$D_1 = \left( \frac{k(\omega_1 - s\omega_1)}{(\omega_1 - s\omega_1)^2 + (\tau_{rc} - \tau_{sc})^2} + \frac{s\omega_1(k-1)}{\tau_{rc}^2 + s^2\omega_1^2} \right)$$

$$D_2 = \left( \frac{L_D}{R_{rc}L_m} - \frac{k(\tau_{rc} - \tau_{sc})}{(\omega_1 - s\omega_1)^2 + (\tau_{rc} - \tau_{sc})^2} + \frac{\tau_{rc}(k-1)}{\tau_{rc}^2 + s^2\omega_1^2} \right)$$

式中:  $u_s$  为故障后DFIG的机端电压;  $R_s$  为定子电阻;  $R_{rc}$  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,  $L_s = L_m + L_{os}$ ,  $L_r = L_m + L_{rs}$ , 其中  $L_{os}$ 、 $L_{rs}$  分别为定、转子漏感,  $L_m$  为定转子绕组互感;  $\omega_1$  为同步转速;  $\omega_r$  为转子转速,  $s = (\omega_1 - \omega_r) / \omega_1$  为转差率。

## 附录B

$$A_{\text{rsc}} = -\sqrt{\frac{L_m^2 i_{d,\text{ref}}^2}{L_s^2} + \left(\frac{L_m i_{q,\text{ref}}}{L_s} + \frac{k u_s}{\omega_1 L_s}\right)^2}$$

$$\beta_1 = (R_r + k_p) L_s / L_D$$

$$\beta_2 = k_1 L_s / L_D$$

$$\beta_r = (j s \omega_1 - j \omega_1 - \tau_s)(j \omega_1 + \tau_s) L_m / L_s$$

$$B_{\text{rsc}} = \text{real} \left[ \frac{-\beta_1 L_m k u_s / L_s}{j \omega_1 \left[ (j \omega_1 + \tau_s)^2 - \beta_1 (j \omega_1 + \tau_s) + \beta_2 \right]} + \frac{k_2 u_s}{j \omega_1 L_s} \right]$$

$$C_{\text{rsc}} = -\frac{L_m \sqrt{i_{q,\text{ref}}^2 + i_{d,\text{ref}}^2}}{L_s (\alpha_1 - \alpha_2)}$$

$$\alpha_1 = \frac{-(R_r + k_p) L_s + \sqrt{[(R_r + k_p) L_s]^2 - 4 k_1 L_s L_D}}{2 L_D}$$

$$\alpha_2 = \frac{-(R_r + k_p) L_s - \sqrt{[(R_r + k_p) L_s]^2 - 4 k_1 L_s L_D}}{2 L_D}$$

式中： $k_p$ 、 $k_1$ 分别为RSC变流器的比例、积分参数； $i_{d,\text{ref}}$ 、 $i_{q,\text{ref}}$ 分别为转子电流 $d$ 轴和 $q$ 轴的参考值。

## 附录C

表C 单台 1.5 MW DFIG 的仿真参数

Table C Simulation parameters of single 1.5 MW DFIG

参数	数值/p.u.	参数	数值/p.u.
功率因数	0.9	转子转速	1.2
定子电阻	0.004 88	定子漏感	0.138 6
转子电阻	0.005 49	转子漏感	0.149 3
撬棒阻值	0.05	定转子互感	3.952 7

## 参考文献

- [1] HANSEN A D, HANSEN L H. Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995-2004)[J]. Wind Energy, 2007, 10(1): 81-85.
- [2] 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.
- [3] 欧阳金鑫, 熊小伏, 张涵轶. 电网短路时并网双馈风电机组的特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 17-25.
- OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, ZHANG Hanyi. Characteristics of DFIG-based wind generation under grid short circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 17-25.
- [4] 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(3): 169-182. DOI: 10.1186/s41601-018-0090-4.
- [5] MORREN J, DE HAAN S W H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 174-180.
- [6] BOUBZIZI S, ABID H, ELHAJJAJI 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.
- [7] 张保会, 王进, 郝治国, 等. 风电接入对继电保护的影响(三)——风电场送出变压器保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 1-8.
- ZHANG Baohui, WANG Jin, HAO Zhiguo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (3): performance analysis for wind farm outgoing transformer protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 1-8.
- [8] SMITH J C, MILLIGAN M R, DEMEO E A, et al. Utility wind integration and operating impact state of the art[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 2(3): 900-908.
- [9] 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.
- [10] 杨刚, 潘文霞, 刘明洋, 等. 考虑 Crowbar 电阻的双馈电机短路电流实用计算[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2075-2080.
- YANG Gang, PAN Wenxia, LIU Mingyang, et al. Practical calculation of short-circuit current of DFIG considering crowbar resistance[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2075-2080.
- [11] 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[J]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 卜强生, 高磊, 宋亮亮, 等. 风电场短路电压电流频率不一致对距离保护及测试的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 21-27.
- BU Qiangsheng, GAO Lei, SONG Liangliang, et al. Short circuit current and voltage frequency inconsistency in wind farm and its effect on distance protection and relay protection test[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 21-27.
- [18] 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.
- [19] 王玉婷, 陈福锋, 薛明军, 等. 适用于双馈风电场并网的自适应距离保护[J]. 供用电, 2017, 34(8): 74-78.
- WANG Yuting, CHEN Fufeng, XUE Mingjun, et al. An adaptive distance protection for DFIG wind farms[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(8): 74-78.
- [20] 王婷, 李凤婷, 何世恩. 影响风电场联络线距离保护的要素及解决措施[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.
- [21] 洪树斌, 范春菊, 陈实. 考虑双馈异步风机特性的自适应接地距离保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 124-133.
- HONG Shubin, FAN Chunju, CHEN Shi. Adaptive ground distance protection considering doubly-fed induction generator characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 124-133.
- [22] 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.
- [23] 何荷. 输电线路快速距离保护研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- HE He. Research of fast distance relay for transmission[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [24] 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.

收稿日期: 2019-05-25; 修回日期: 2019-07-22

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

张雪娟(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为风电接入对系统稳定性的影响。E-mail: 982328600@qq.com

(编辑 周金梅)