

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211229

基于同步挤压小波变换的双馈风电场送出变保护研究

杨兴雄¹, 曲延滨², 宋蕙慧², 黄柯昊¹, 范小红¹

(1. 昆明理工大学, 云南 昆明 650500; 2. 哈尔滨工业大学(威海校区), 山东 威海 264200)

摘要: 目前, 电力变压器的保护研究及优化多是针对传统电源, 少有文献研究双馈风电场电源下计及 RSC 控制电路的变压器保护。而当双馈风电场并入弱电网时, 传统变压器差动保护又存在动作性能变差的问题。基于此, 分析了系统发生故障时, 计及 Crowbar 保护电路与计及 RSC 控制电路的短路电流特性, 推导了两种运行条件下短路电流经傅里叶算法提取后的误差表达式。在此基础上, 分析了致使传统差动保护性能降低的原因, 从而提出利用同步挤压小波变换进行故障特征提取并联合归一化二维轨迹图对故障进行识别并动作的保护新方案。该方案不受风电场短路电流特性的影响, 在双馈风电场送出变中具有更好的适用性和更高的精确性。最后, 在 Matlab/Simulink 平台上搭建双馈风电场仿真模型, 验证了该方案在不同故障类型、励磁涌流、不同大小噪声及非同步数据传输影响下的有效性。

关键词: 双馈风机; 频率偏移特性; 同步挤压小波变换; 变压器保护; 二维轨迹图

Wind farm transmission transformer protection based on synchrosqueezed wavelet transform

YANG Xingxiong¹, QU Yanbin², SONG Huihui², HUANG Kehao¹, FAN Xiaohong¹

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Harbin Institute of Technology (Weihai Branch), Weihai 264200, China)

Abstract: At present, protection research and optimization of a power transformer are mostly aimed at the traditional power supply, and there is little work on transformer protection considering an RSC control circuit under the power supply of doubly fed wind farm. When the doubly-fed wind farm is connected to a weak current network, the action performance of the traditional transformer differential protection becomes worse. Based on this, this paper analyzes the characteristics of short-circuit current with a crowbar protection circuit and RSC control circuit when the system fails, and deduces the error expression of short-circuit current extracted by a Fourier algorithm under two operating conditions. The reasons for the degradation of the performance of the traditional differential protection are analyzed, and a new protection scheme is proposed, one which uses a synchronous squeezed wavelet transform to extract the fault features and combines the normalized two-dimensional trajectory diagram to identify and act on the fault. The scheme is not affected by the short-circuit current characteristics of the wind farm. It has better applicability and higher accuracy in the output transformer of a doubly-fed wind farm. Finally, a simulation model of doubly fed wind farm is built on Matlab/Simulink platform to verify the effectiveness of the scheme under the influence of different fault types, inrush current, different noise and asynchronous data transmission.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61773137).

Key words: doubly-fed induction generator; frequency offset characteristics; synchrosqueezed wavelet transform; transformer protection; two-dimensional trajectory figure

0 引言

风能作为一种可再生的清洁能源, 已成为世界

各国发展的热点, 也是能源战略中不可或缺的部分^[1-6]。DFIG 以其调节快速、变速恒频运行等优点, 成为了目前风力发电应用中的主流机型。但系统发生深度电压跌落故障时, DFIG 转子侧撬棒(Crowbar)电路的投入使得短路电流呈现出多样性、复杂性, 频率范围变为 35~60 Hz, 致使变压器两侧电流频率差别较大^[7-8]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61773137); 山东省自然科学基金项目资助(ZR2019MF030); 中国博士后科学基金项目资助(2018M641830)

电力变压器常以差动保护作为主保护, 该保护采用了比率制动元件、涌流闭锁元件、差动速断元件动作逻辑相互配合来区分内外部故障从而决定保护是否动作^[9-11]。但电流频率偏移时, 基于相量值的差动保护、基于采样值的差动保护动作性能都变差。一方面是 DFIG 短路电流成分的多样性和复杂性, 另一方面, 基于工频分量的傅里叶算法作为差动保护配置的基础, 当频率偏离于工频时, 该算法本身也存在着误差, 两方面原因共同导致了传统差动保护性能变差^[12-14]。为提高继电保护动作的可靠性, 近年来小波分解及其相关衍生改进算法在电网信号分析中表现出良好的前景^[15-17]; 但连续小波变换处理结果依赖于小波母函数的选择, 且处理结果分辨率较低, 为此, 文献[18]在现有小波分析的基础上, 提出了同步挤压小波变换(Synchrosqueezed Wavelet Transform, SWT)算法, 被广泛应用于医疗科学、地理勘探、图像处理等方面; 而文献[19-20]在文献[18]的基础上做了进一步的研究, 将同步挤压小波变换应用于线路暂态保护及时变谐波分析中, 取得了进一步的研究成果。

以上文献对变压器保护和故障信号处理方面进行了深入的研究, 但针对双馈风电场送出变的研究还需要进一步深入。一方面, 目前的研究多是针对传统电源, 部分针对双馈风电场电源的研究也主要是在计及 Crowbar 动作情况下进行的, 而实际系统故障时, 大多故障不会引发 Crowbar 动作^[21-22]; 另一方面, 同步挤压小波变换具有特定频段提取、多干扰多谐波信号的提取及频率“聚焦”等优点, 在模式识别、图像处理等方面得到了广泛应用, 但鲜有文献报道将该方法的优点用于风电场送出变的继电保护中。

综上, 针对双馈风电场并入弱交流系统的特殊性, 本文从解析式角度推导并分析了计及 RSC 控制和计及 Crowbar 动作下的短路电流及其傅里叶分解表达式, 得到了致使传统保护动作性能降低的原因, 从而提出了将 SWT 应用于更切合该方法特点的风电场短路电流提取中, 并联合两侧归一化电流二维轨迹图斜率对故障进行识别的保护新方案。结果表明, 解析式的理论推导与仿真相符, 以 SWT 联合归一化二维轨迹图斜率判别故障并动作的保护方案在各运行工况下具有良好可靠性和有效性。

1 DFIG 短路电流特性及其对传统保护的影响

1.1 DFIG 短路电流特性分析

1.1.1 计及 Crowbar 保护电路

变压器保护配置目前仍采用传统的差动保护方案, 并未充分考虑风电场短路电流的特殊性对差动保护中比率制动模块、涌流闭锁模块的影响。

含有 Crowbar 保护电路的 DFIG 并网结构如图 1 所示, 其定子侧直接与电网相连, 而转子侧通过变流器与电网相连。变流器主要用于为转子提供转差频率的励磁电流, 从而实现 DFIG 的变速恒频发电运行。

由于变流器容量较小, 当发生转子侧过电流时, 变流器极易损坏, 所以转子侧配备了 Crowbar 保护电路。当系统发生故障导致转子侧过电流时, Crowbar 保护电路投入对变流器进行短接, 这一过程时间短, 波形复杂。

DFIG 在发生三相对称故障后定转子短路电流可以表示为式(1), 发生不对称故障后定子短路电流正负序分量可表示为式(2)^[23]。

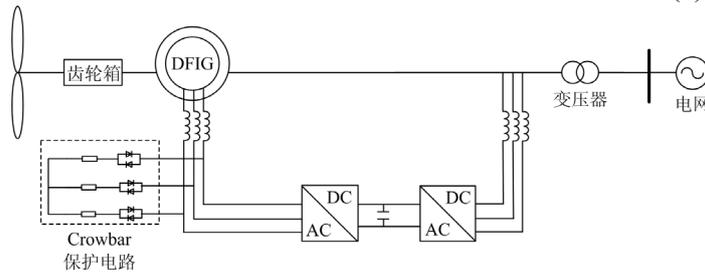


图 1 含 Crowbar 保护电路的 DFIG 并网结构

Fig. 1 Grid connected structure of DFIG with Crowbar protection circuit

$$\begin{cases} \dot{i}_s = A_s e^{j\omega t} + B_s e^{-t/\tau_s} + C_s e^{j(1-s)\omega t} e^{-t/\tau_r} \\ \dot{i}_r = A_r e^{js\omega t} + B_r e^{j(s-1)\omega t} e^{-t/\tau_s} + C_r e^{-t/\tau_r} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{i}'_s = \dot{i}_s^+ + \dot{i}_s^- \\ \dot{i}_s^+ = A_{s1}^+ e^{j\omega t} + B_{s1}^+ e^{-t/\tau_s} + C_{s1}^+ e^{j(1-s)\omega t} e^{-t/\tau_r} \\ \dot{i}_s^- = A_{s2}^- e^{js\omega t} + B_{s2}^- e^{-t/\tau_s} + C_{s2}^- e^{j(1-s)\omega t} e^{-t/\tau_r} \end{cases} \quad (2)$$

式中: 下标 s 表示定子侧电气量; 下标 r 表示转子侧电气量; \dot{i}_s 、 \dot{i}_r 表示三相对称故障下定转子短路电流; \dot{i}'_s 表示不对称故障下定子短路电流; \dot{i}_s^+ 、 \dot{i}_s^- 分别表示不对称故障下定子短路电流正序、负序分量; s 表示风机转差率; $\tau_s = L_D / (R_s L_r)$ 表示定子侧时间衰减系数; $\tau_r = L_D / (R_r L_s)$ 表示转子侧时间衰减

系数； A 、 B 、 C 表示各电流分量系数，各参数具体表达式见附录中式(1)、式(2)。

由式(1)可知，系统发生三相对称故障后，由于Crowbar保护电路的投入，定子侧的短路电流除了基频分量、衰减直流分量以外，还有衰减转速频率分量。系统发生不对称故障时，由式(2)可知，定子短路电流中也含有基频分量、衰减直流分量和衰减转速频率分量。其中，衰减转速频率分量频率大小取决于故障前的转速。一般地，DFIG运行时，转速在0.7~1.2 p.u.之间，因此短路后定子侧电流频率在35~60 Hz之间，偏离于工频50 Hz。

1.1.2 计及RSC控制电路

双馈风机的Crowbar保护电路一般在机端电压深度跌落时间歇性投入，而大部分故障机端电压跌落较轻，保护电路不投入^[24]，此时，双馈风机的转子侧变流器仍正常工作，控制降低短路电流。因此，本节研究计及RSC控制电路情况下的短路电流特性。

系统发生机端电压轻度跌落故障时，计及RSC控制电路的双馈风机短路电流可表示为^[25]

$$\begin{cases} \dot{i}_{s_rsc} = A_{s_rsc} e^{j\omega_0 t} + B_{s_rsc} e^{-t/\tau_s} + \\ C_{s_rsc} \left(\frac{1}{\tau_1} e^{-t/\tau_2} - \frac{1}{\tau_2} e^{-t/\tau_1} \right) e^{j\omega_0 t} \\ \dot{i}_{r_rsc} = A_{r_rsc} e^{js\omega_0 t} + B_{r_rsc} e^{j(s-1)\omega_0 t} e^{-t/\tau_s} + \\ C_{r_rsc} \left(\frac{1}{\tau_1} e^{-t/\tau_2} - \frac{1}{\tau_2} e^{-t/\tau_1} \right) e^{js\omega_0 t} \end{cases} \quad (3)$$

式中：下标 s_rsc 表示计及RSC控制的定子侧电气量；下标 r_rsc 表示计及RSC控制的转子侧电气量； s 表示风机转差率； τ_1 、 τ_2 表示计及RSC控制的时间衰减系数，受变流器参数及PI控制参数的影响； A 、 B 、 C 表示电流各分量系数，具体表达式见附录中式(3)。

由式(3)可知，由于电压轻度跌落未投入Crowbar对变流器进行短接，转子侧变流器仍在工作，转子侧不存在磁链突变。故计及RSC控制的双馈风机转子电流中含转差频率分量、衰减的转速频率分量和暂态自然分量，而定子短路电流含有基频分量、衰减直流分量和暂态自然分量。

1.2 DFIG短路电流对送出变保护的影响

傅里叶算法作为变压器保护配置的基础，其对故障特征提取的准确与否直接关系到保护是否能够正确动作。但由式(1)~式(3)可知，DFIG短路电流存在暂态自然分量及多种频率分量的相互叠加，使得无论是计及Crowbar保护电路还是计及RSC控制电路，DFIG短路电流频率均不再保持在50 Hz，这

将对基于工频量的傅里叶算法产生影响。

以A相为例，对计及Crowbar保护电路和计及RSC控制电路的定子短路电流进行傅里叶变换，以研究短路电流特性对傅里叶算法的影响。傅里叶变换下正余弦系数计算式为^[26-27]

$$\begin{cases} I^{\cos} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i_s(t) \cos(\omega_0 t) dt \\ I^{\sin} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i_s(t) \sin(\omega_0 t) dt \end{cases} \quad (4)$$

由式(1)、式(2)可以发现，计及Crowbar保护电路时，无论系统发生对称或者不对称故障，其定子短路电流各频率分量成分都是相同的，该电流经过差分滤波处理后，认为短路电流中不再含有直流分量，因此可将定子短路电流表示为

$$\dot{i}_s = A_s \sin(\omega_0 t + \varphi) + C_s e^{-t/\tau_s} \sin(\omega_r t + \varphi) \quad (5)$$

式中： ω_0 表示定子电流工频角频率(同步转速)； φ 表示定子电流初相角； ω_r 表示转子电流角频率。将式(5)代入式(4)，得到计及Crowbar保护电路时傅里叶算法后的定子电流基频分量正余弦系数及幅值相角，如式(6)所示。

$$\begin{cases} I_c^{\sin} = A_s \cos \varphi + \Delta I_c^{\sin} \\ I_c^{\cos} = A_s \sin \varphi + \Delta I_c^{\cos} \\ |I_c| = \sqrt{(I_c^{\cos})^2 + (I_c^{\sin})^2} = |I_{c0}| + \Delta |I_c| \\ \angle |I_c| = \arctan \left(\frac{I_c^{\cos}}{I_c^{\sin}} \right) = \angle |I_{c0}| + \Delta \angle |I_c| \end{cases} \quad (6)$$

式中： I_c^{\cos} 表示计及Crowbar保护电路时定子电流基频分量傅里叶余弦系数； I_c^{\sin} 表示基频分量傅里叶正弦系数； $|I_c|$ 表示基频分量幅值； $\angle |I_{c0}|$ 表示基频分量相角，具体表达式见附录中式(4)。

同理，将式(3)中定子电流进行差分滤波除直流分量后进行傅里叶变换，得到计及RSC控制电路时定子电流经傅里叶算法后基频分量正余弦系数及幅值相角，如式(7)所示。

$$\begin{cases} I_{s_rsc}^{\sin} = A_{s_rsc} \cos \varphi + \Delta I_{s_rsc}^{\cos} \\ I_{s_rsc}^{\cos} = A_{s_rsc} \sin \varphi + \Delta I_{s_rsc}^{\sin} \\ |I_{s_rsc}| = \sqrt{(I_{s_rsc}^{\cos})^2 + (I_{s_rsc}^{\sin})^2} = |I_{s_rsc0}| + \Delta |I_{s_rsc}| \\ \angle |I_{s_rsc}| = \arctan \left(\frac{I_{s_rsc}^{\cos}}{I_{s_rsc}^{\sin}} \right) = \angle |I_{s_rsc0}| + \Delta \angle |I_{s_rsc}| \end{cases} \quad (7)$$

式中： $I_{s_rsc}^{\cos}$ 表示计及RSC控制电路时定子电流基频分量傅里叶余弦系数； $I_{s_rsc}^{\sin}$ 表示基频分量傅里叶正弦系数； $|I_{s_rsc0}|$ 表示电流基频幅值； $\angle |I_{s_rsc0}|$ 表示基频分量相角。具体表达式见附录中式(5)。

分析式(6)、式(7)可以发现, 无论计及 Crowbar 保护电路还是计及 RSC 控制电路, DFIG 短路电流经过傅里叶变换后, 基频分量幅值、相角均不再保持恒定, 而是叠加了一个误差分量, 该误差分量受到 Crowbar 阻值、变流器控制参数及故障前运行工况等多方面因素的影响。该误差使得基于相量值的比率制动环节动作值和制动值产生误差, 代入差动保护动作方程时, 会对变压器保护动作性能产生影响。

同理, 以同样的方法对计及 Crowbar 保护电路

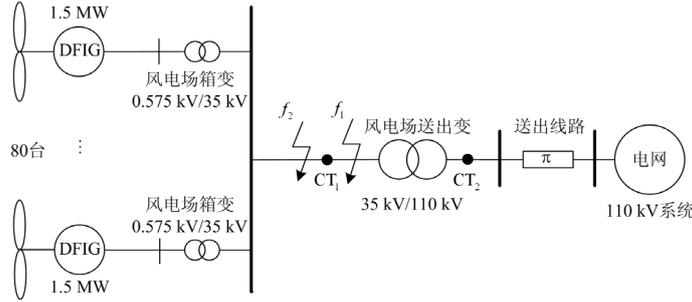


图 2 仿真系统结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of simulation system

该系统包含 80 台 1.5 MW 的 DFIG, 每台风机经箱变将出口处电压由 0.575 kV 升高至 35 kV, 并汇集到集电线路, 再经主变压器将电压升高送至 110 kV 母线。系统中各元件主要参数为: DFIG 额定功率为 1.5 MW, 功率因数为 0.9, 转差率为 0.2, 额定电压为 0.575 kV; 110 kV 电网系统正序阻抗 $Z_{s1} = 7 \Omega$, 零序阻抗 $Z_{s0} = 11 \Omega$; 输电线路正序阻抗 $Z_{l1} = 0.1153 + j0.215 \Omega/\text{km}$, 零序阻抗 $Z_{l0} = 0.4153 + j0.713 \Omega/\text{km}$; 风电场主变额定容量为 250 MVA, 额定电压为 38.5 kV/110 kV, 短路电压百分比 $U_k(\%) = 10.2$ 。

假设 $t = 1\text{s}$ 时送出变保护区内 f_1 点发生三相故障, 第一种工况, 计及 Crowbar 保护电路: 电压跌落至 Crowbar 动作值, 经过 5 ms 延时后投入 Crowbar 保护电路, 传统差动保护动作结果如图 3 所示。第二种工况, 计及 RSC 控制电路: 电压非深度跌落, Crowbar 保护电路不动作, 传统差动保护动作结果如图 4 所示。

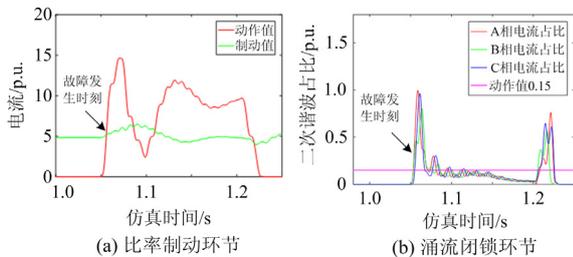


图 3 计及 Crowbar 保护电路时传统差动保护动作情况

Fig. 3 Action of traditional differential protection considering Crowbar protection circuit

和计及 RSC 控制电路的 DFIG 短路电流二次谐波进行傅里叶变换, 得到的结论与基频分量误差分析相同, 且二次谐波幅值和相角的波动误差更大, 此处不再赘述。二次谐波傅里叶提取误差会使得基于二次谐波占比的涌流闭锁环节动作值也在大范围波动, 从而导致差动保护被闭锁而拒动。

1.3 传统差动保护方案在风电场中的适应性分析

为验证传统变压器保护方案在风电场中的适应性, 按照图 2 所示系统搭建双馈风电场仿真模型。

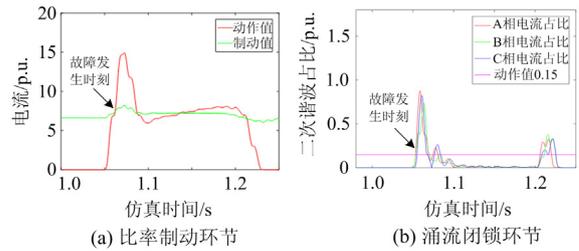


图 4 计及 RSC 控制电路时传统差动保护动作情况

Fig. 4 Action of traditional differential protection considering RSC control circuit

分析图 3、图 4 发现, DFIG 短路电流经傅里叶算法提取后代入动作方程, 比率制动环节和涌流闭锁环节的动作值都出现了较大波动。计及 Crowbar 保护电路时, 比率制动环节(A 相)在 $t = 1.05 \sim 1.08\text{s}$ 期间, 动作值大于制动值, 保护正确动作, 而在 $t = 1.08 \sim 1.12\text{s}$ 期间, 动作值小于制动值, 保护出现了拒动。二次谐波涌流闭锁环节在 $t = 1.05 \sim 1.07\text{s}$ 及 $t = 1.08 \sim 1.10\text{s}$ 期间, 二次谐波占比大于动作值 0.15, 将故障识别为励磁涌流, 导致差动保护环节闭锁, 出现了保护拒动。计及 RSC 控制电路时, 比率制动环节也在 $t = 1.09 \sim 1.14\text{s}$ 期间出现了拒动, 二次谐波涌流闭锁环节在 $t = 1.05 \sim 1.08\text{s}$ 及 $t = 1.085 \sim 1.10\text{s}$ 期间出现了拒动。与 1.2 节的理论分析相符。

综上, 传统变压器保护配置应用于风电场送出变中, 由于风电场短路电流的特殊性, 在风电渗透

率较大、短路容量比较高时，基于傅里叶提取的传统差动保护方案存在不正确动作的情况，需要进一步探索适应于风电场送出变的保护新方案。

2 基于同步挤压小波变换的变压器保护算法

2.1 同步挤压小波变换原理

同步挤压小波变换由 Daubechies 等人提出，该算法能够对相近频率的小波系数进行累加，并将其在中心频率附近进行挤压、锐化，从而提高提取某频率或频段分量的精度，获得更为精确和清晰的时频曲线。从多含量复合信号中提取特定信号的基本过程如下所述。

1) 对复合信号 $f(t)$ 进行小波变换(CWT)，计算出连续小波系数 $W_f(a,b)$ ，如式(8)。

$$W_f(a,b) = (f(t), \varphi_{a,b}(t)) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (8)$$

式中： a 表示尺度因子； b 表示平移因子； $\varphi(t)$ 表示母小波函数； $\overline{\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$ 表示共轭。

2) 对时频信号进行频率划分，设复合信号 $f(t)$ 的长度为 $n=2L+1$ ，采样时间间隔为 Δt ，取 $n_v=32$ ， $n_a=Ln_v$ ，设 $\omega_0 = \frac{1}{n\Delta t}$ ，规定 $\omega_\ell = 2^{\ell\Delta\omega} \omega_0$ ， $\ell \in [0, n_a-1]$ ，信号频率间隔可表示为 $\Delta\omega = \frac{1}{n_a-1} \log_2\left(\frac{n}{2}\right)$ ，信号的频率区间可划分为

$$W_\ell = \left(\omega_\ell - \frac{\Delta\omega}{2}, \omega_\ell + \frac{\Delta\omega}{2}\right) \quad (9)$$

式中， W_ℓ 表示频率分量 ℓ 的中心频率。

3) 在中心频率处利用连续小波系数对信号进行同步挤压小波变换(SWT)，计算同步挤压小波系数。

$$T_f(\omega_\ell, b) = (\Delta\omega)^{-1} \sum_{a_k: |\omega_f(a,b) - \omega_\ell| \leq \frac{\Delta\omega}{2}} W_f(a,b) a_k^{-\frac{2}{3}} (\Delta a)_k \quad (10)$$

由以上基本步骤，SWT 变换通过将小波系数 $W_f(a,b)$ 挤压后限制在中心频率 ω_ℓ 附近，使得各频率曲线更加聚焦、细化，不再产生频率交叉现象，从而避免了频率混叠。

4) 对复合信号 $f(t)$ 的基波或某次谐波进行提取，只需要对处理后的同步挤压小波变换系数进行反变换就可提取出该信号的基波或某次谐波 $f_k(t)$ 。

$$f_k = \text{Re} \left[C_\psi^{-1} \sum_\ell T_f(\omega_\ell, b) \Delta\omega \right] \quad (11)$$

式中， $C_\psi^{-1} = \frac{1}{2} \int_0^\infty \overline{\psi(\xi)} \frac{d\xi}{\xi}$ ， $\overline{\varphi(\xi)}$ 为小波函数 $\varphi(\xi)$ 的共轭。

2.2 基于同步挤压小波变换的保护算法

2.2.1 保护算法

针对风电场短路电流频率偏移及多频率混叠的特点，基于同步挤压小波变换的保护算法利用式(8)一式(10)将短路电流向各中心频率挤压、聚焦，得到更为准确、细化的各频率含量。然后利用式(11)对特定频率进行提取，风电机组配置传统工频量保护，因此本文对工频量进行提取，从而得到不受谐波和其他频率分量信号干扰的工频量。最后，利用提取出的两侧电流 3 周波数据进行二维轨迹重构，通过轨迹图斜率实现故障识别，并根据识别结果来决定保护是否动作。具体保护流程如图 5 所示。

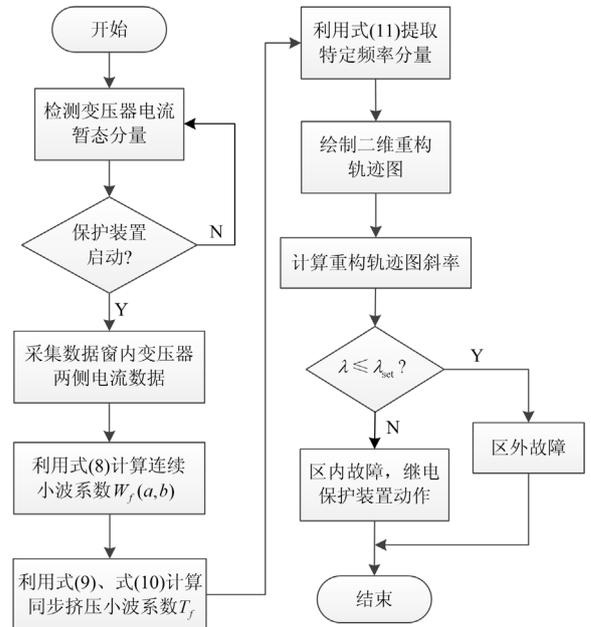


图 5 基于同步挤压小波变换的变压器保护算法

Fig. 5 Transformer protection algorithm based on synchrosqueezed wavelet transform

2.2.2 归一化处理及保护判据设定

二维轨迹图是指以变压器两侧电流为自变量、因变量绘制的图像，该图像能够较为全面地反映出两侧电流的关系，区内区外故障特征较为明显^[28]。

在传统双端电源系统中：变压器发生区内故障时，两侧电流 i_1 、 i_2 相位差为 0，电流呈现出相同趋势，二维轨迹图的中心斜率为正，如图 6(a)、图 6(c) 所示；而区外故障时，两侧电流相位相反，相位差不为 0，电流呈现出相反趋势，二维轨迹图的中心斜率为负，如图 6(b)、图 6(d) 所示。

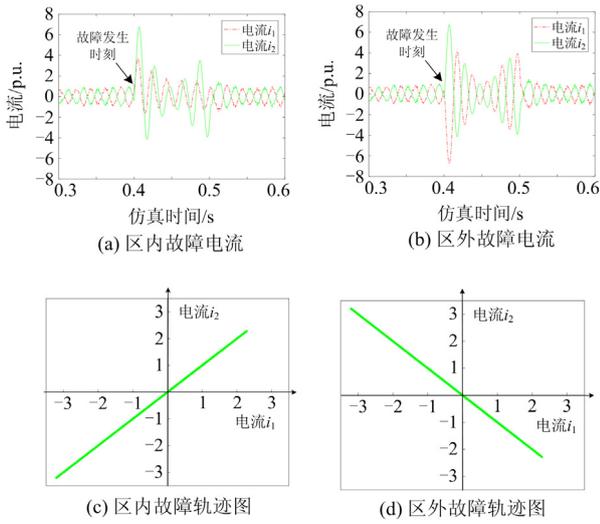


图 6 不同故障下电流波形及二维轨迹图

Fig. 6 Current waveform and two-dimensional trajectory under different faults

该算法主要是对相位信息进行提取应用,但在风电场送出变保护中,由于区内故障时两侧电流幅值差异较大,幅值的大小会严重影响保护判据整定值的设定,压缩故障特征。为此,本文采用两侧电流归一化^[28-29]处理,以此降低幅值差异对故障特征和保护判据的影响,即:在一定时间窗内提取定子电流序列的最大值 i_{\max} 与最小值 i_{\min} ,并以此为基准值,对电流序列进行归一化,如式(12)所示。

$$i^*(k) = 1 + 2/(i_{\max} - i_{\min}) \cdot (i(k) - i_{\min}) \quad (12)$$

式中: k 表示时间窗内采集的第 k 个定子电流序列点; $i^*(k)$ 表示第 k 个定子电流序列归一化值,通过该式可将电流值归一化到 $[-1,1]$ 范围内。

根据上述对图6区内外故障的特征分析,以归一化的定子电流二维轨迹图斜率 λ 作为判据,对故障进行判别。对于 λ_{set} 的选取,从区内外故障时两侧电流相位的特点可知,即使在非理想情况下,区内故障时两侧电流相位差不严格为 0° ,区外故障时两侧电流相位差不严格为 180° ,但从斜率角度来看,特征依然明显,结合现有文献及仿真实验,本文中取0.005。

- ① 若 $\lambda \leq \lambda_{\text{set}}$, 则判别为变压器发生区外故障。
- ② 若 $\lambda > \lambda_{\text{set}}$, 则判别为变压器发生区内故障。

3 仿真验证

为进一步验证第2节所述方法的有效性,仍以1.3节图2所示系统变压器高低压侧发生区内外故障为例进行验证,并对该方案在不同故障类型、励磁涌流、不同大小噪声及非同步数据传输条件下进

行仿真测试。

3.1 简单函数的 SWT 变换

风电机组短路电流呈现出多分量多频率混叠的特点,为了更直观地验证 SWT 对于多频率混叠提取的优点,先以简单函数为例进行验证,该简单函数为

$$f(t) = \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t) + 3\sin(2\pi \cdot 110 \cdot t) + \sin(2\pi \cdot 250 \cdot t) \quad (13)$$

图7为对该函数的CWT提取和SWT提取的对比图,从图中可以看出,SWT相较于CWT,对混叠频率具有更好的提取效果,提取精度及分辨率较高,能够将各频率分量向其中心频率“聚焦”。

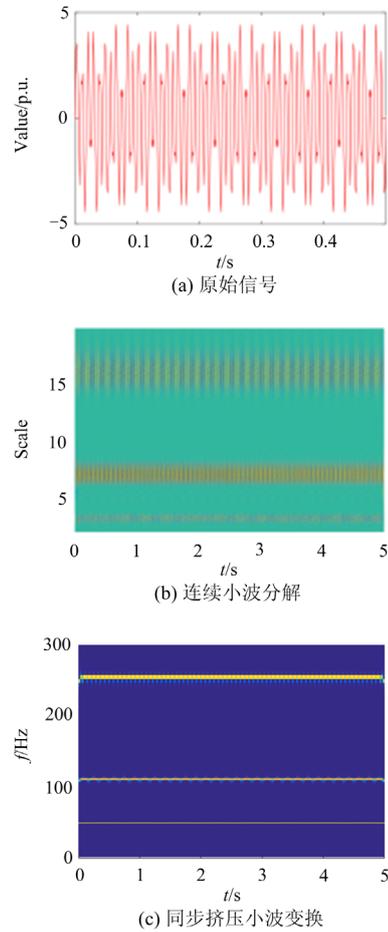


图 7 简单函数的 CWT 及 SWT 提取

Fig. 7 CWT and SWT extraction of simple functions

3.2 基于 SWT 变换的变压器保护算法验证

利用前述方法对风电场送出变两侧差流进行 SWT 变换,然后利用式(11)对特定频率的电流进行提取,以获得不受谐波及其他频率分量干扰的工频量,结果如图8所示。最后对提取出的电流进行归一化并绘制二维轨迹图,以轨迹图最小二乘拟合出

的中心斜率为判据，判断不同故障工况。以最为严重的三相内外部故障为例，研究该方案下故障识别的正确性，结果如图 9 所示。

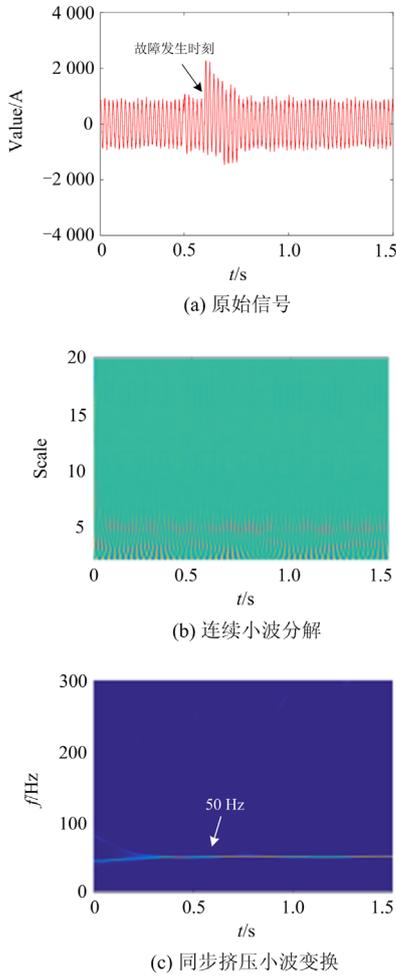


图 8 仿真模型下的 CWT 及 SWT 提取

Fig. 8 CWT and SWT extraction of simulation model

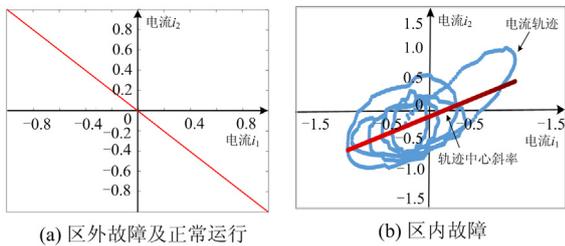


图 9 三相故障时两侧电流二维轨迹图

Fig. 9 Two-dimensional trace diagram of current on both sides in case of three-phase fault

从图 8 中可以看出：利用传统的 CWT 提取双馈风电机组短路电流时，信号提取效果差，分辨率较低；而利用 SWT 提取风机短路电流时，信号更为准确和精细化，能够有效地避免频率交叉混叠，

该方法更加适用于双馈风场。图 9 结果表明，区外故障时归一化二维轨迹图中心斜率为-1，区内故障时中心斜率为 0.65，依据 2.2.2 节判据的设定值 0.005，该方案判据能够正确、可靠地对故障进行判别，正确识别该故障为内部故障。

3.3 不同运行工况下保护算法验证

3.3.1 不同故障类型的影响

分别在变压器高低压侧设置不同类型故障，利用本文方案对故障进行判别及动作，其结果归纳如表 1。

表 1 不同故障类型的仿真结果

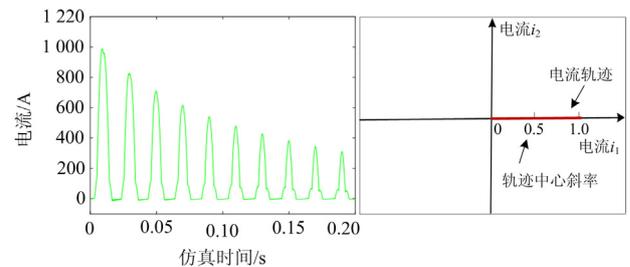
Table 1 Simulation results of different fault types			
故障位置	故障类型	λ	判别结果
区外故障	单相接地	-0.988	正确不动作
	两相相间	-0.991	正确不动作
	两相接地	-0.991	正确不动作
	三相短路	-0.989	正确不动作
区内故障	单相接地	0.863	正确动作
	两相相间	0.815	正确动作
	两相接地	0.809	正确动作
	三相短路	0.65	正确动作

根据表 1 的结果，区外故障时，二维轨迹图斜率均为接近-1 的负数。而区内故障时，二维轨迹图斜率为接近 1 的正数，最严重的三相故障时斜率为 0.65，相较于设定的判据 0.005，故障特征依然明显。所以，基于同步挤压小波变换的变压器保护方案故障特征明显，判据简单有效，针对单相、两相、三相区内外故障均能正确判别。

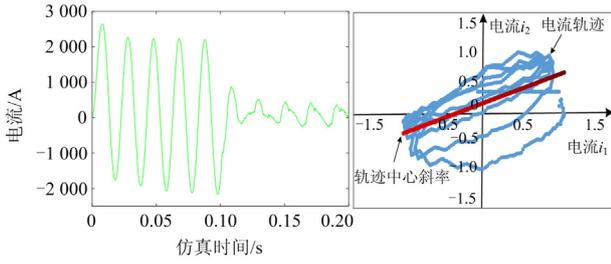
3.3.2 励磁涌流的影响

根据 1.2 节分析及仿真发现，由于 DFIG 短路电流的特性，二次谐波分量经傅里叶变换后，幅值及相角均存在较大的波动，而励磁涌流发生时，二次谐波含量更高，更易导致变压器保护拒动。为此，本节验证该方案在励磁涌流影响下的有效性。以图 2 系统为例，设置故障持续时间为 $t = 0 \sim 0.1s$ ，仿真结果如图 10 所示。

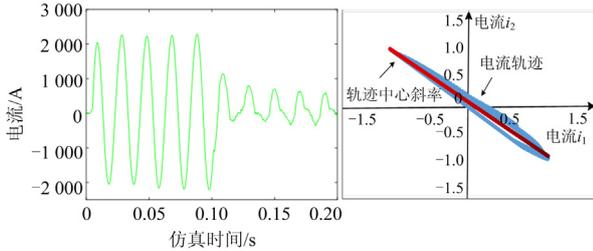
从图 10(a)–10(c)中可以看出，三种故障工况下斜率分别为 0、0.57、-1，根据设定的判据值 0.005，



(a) 空载合闸时励磁涌流及电流二维轨迹图



(b) 合闸于区内三相故障时变压器电流及电流二维轨迹图



(c) 合闸于区外三相故障时变压器电流及电流二维轨迹图

图 10 不同合闸条件二维轨迹图

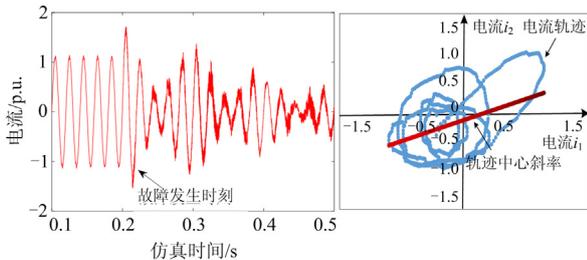
Fig. 10 Two-dimensional trajectory diagram under different closing conditions

能够正确判别出励磁涌流的非故障状态及三相区内外部故障状态。结果表明无论是空载合闸还是带故障合闸, 该方案都能够有效地进行故障识别, 相较于 1.2 节传统保护, 该方案具有更高的动作可靠性。

3.3.3 不同大小噪声的影响

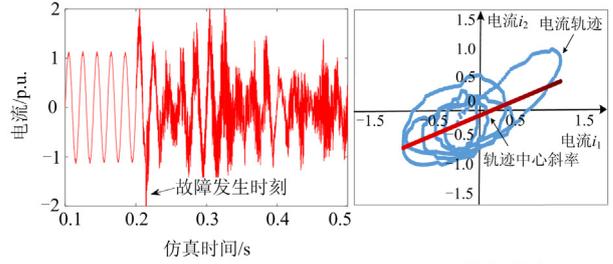
为更加切合实际电网中多频率多谐波干扰的特点, 在原始信号中加入不同信噪比(SNR)的高斯白噪声, 经过 SWT 变换后绘制归一化二维轨迹斜率。以三相区内故障为例加入噪声进行仿真, 结果如图 11 所示。

从图 11 中可以看出, 信噪比越小, 噪声对原始信号的干扰越大, 致使原始信号产生畸变。但同步挤压小波变换保护方案针对不同大小的噪声干扰都表现出良好的鲁棒性, 能够对原始信号进行有效提取, 从而确保了故障识别的准确性。本文方案下, SNR 为 9 时, 归一化轨迹图斜率为 0.51, SNR 为 3 时, 归一化轨迹图斜率为 0.68, 大于本文动作判据值, 正确识别该故障为内部故障, 判别结果不受噪声的影响。



(a) 原始信号(SNR=9)

(b) 二维轨迹图



(c) 原始信号(SNR=3)

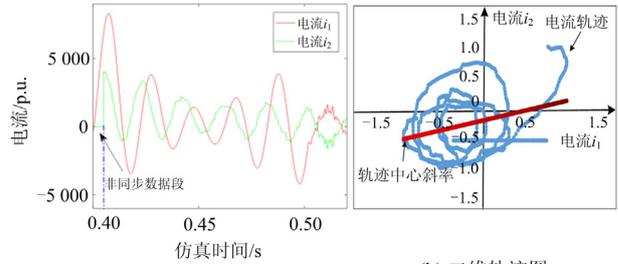
(d) 二维轨迹图

图 11 不同大小噪声下的二维轨迹图

Fig. 11 Two-dimensional trajectory under different noise levels

3.3.4 非同步数据传输的影响

信号传输及采样延时等因素都会造成两侧数据的非严格同步, 可能对保护产生影响。以三相区内故障时短路电流 i_2 延迟采样约 5 ms 为例, 对同步挤压小波变换保护方案进行验证, 结果如图 12 所示。



(a) 两侧电流波形

(b) 二维轨迹图

图 12 数据传输延时 2 ms 时二维轨迹图

Fig. 12 Two-dimensional trajectory diagram with data transmission delay of 2 ms

从图 12(a)中可以看出, 数据传输延时 2 ms 时, 未采集到电流 i_2 , 该段电流数据为零, 即: 非同步数据段。但从图 12(b)归一化二维轨迹图中可以得到其中心斜率为 0.332, 根据本文设定的判据依然能够正确识别出该故障为内部故障, 数据传输延时对保护判据存在影响, 但本文方案依然能够正确动作。

4 结论

本文针对双馈风电场并入弱交流电网的故障特性, 提出了一种适应于双馈风电场的基于同步挤压小波变换联合归一化二维轨迹图斜率的保护新方案, 得到以下结论:

1) 分析了计及 Crowbar 保护电路和计及 RSC 控制电路情况下 DFIG 短路电流特性, 并推导了两种工况下短路电流经傅里叶提取后的误差表达式, 该表达式适用于电压深度及非深度跌落情况。

2) 仿真分析发现, 由于 DFIG 短路电流特性及傅里叶提取误差, 传统变压器差动保护方案存在动作性能变差的情况。故本文提出了利用同步挤压小波变换

进行故障特征提取并联合归一化电流二维轨迹图对故障进行识别并动作的保护新方案。结果表明该方案更适用于双馈风电场送出变保护,在各运行工况下都具有良好的适用性,解决了传统保护应用于双馈风电场中受 DFIG 短路电流特性影响而拒动或误动的问题。为双馈风电场送出变继电保护的研究提供一定参考和借鉴意义。

附录

$$\begin{cases} A_s = \left[\frac{R_r L_m^2}{j\omega_1 L_D^2 (1/\tau_r + js\omega_1)} - \frac{L_r}{j\omega_1 L_D} \right] k u_s \\ B_s = \left[\frac{R_r L_m^2}{j\omega_1 L_D^2 (1/\tau_s + j\omega_1 - 1/\tau_r - js\omega_1)} + \frac{L_r}{j\omega_1 L_D} \right] k u_s \\ C_s = \left[\frac{R_r L_m^2 (1/\tau_s + j\omega_1)}{j\omega_1 L_D^2 (1/\tau_r + js\omega_1)(1/\tau_r + js\omega_1 - 1/\tau_s - j\omega_1)} \right] k u_s \\ A_r = \left[\frac{L_m}{j\omega_1 L_D} - \frac{R_r L_m L_s}{j\omega_1 L_D^2 (1/\tau_r + js\omega_1)} \right] k u_s \\ B_r = - \left[\frac{L_m}{j\omega_1 L_D} + \frac{R_r L_m L_s}{j\omega_1 L_D^2 (1/\tau_s + j\omega_1 - 1/\tau_r - js\omega_1)} \right] k u_s \\ C_r = \frac{-R_r L_m L_s (1/\tau_s + j\omega_1)}{j\omega_1 L_D^2 (1/\tau_r + js\omega_1)(1/\tau_r + js\omega_1 - 1/\tau_s - j\omega_1)} k u_s \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} A_{s1}^+ = \left[\frac{R_r L_m}{L_D^2 (1/\tau_r + js\omega_1)} - \frac{L_m}{L_D} \right] \frac{(1-k)U_m e^{j\alpha}}{j\omega_1} \\ B_{s1}^+ = \left[\frac{L_s R_r L_m}{L_D^2 (1/\tau_s + j\omega_1 - 1/\tau_r - js\omega_1)} - \frac{L_m}{L_D} \right] \frac{k U_m e^{j\alpha}}{j\omega_1} \\ C_{s1}^+ = \frac{R_r L_m L_s}{j\omega_1 L_D^2} \left[\frac{L_D U_m e^{j\alpha}}{R_r L_m} - \frac{k U_m e^{j\alpha}}{(1/\tau_r + js\omega_1 - j\omega_1 - 1/\tau_s)} - \frac{(1-k)U_m e^{j\alpha}}{1/\tau_r + js\omega_1} \right] \\ A_{s2}^- = \left[\frac{R_r L_m L_s}{L_D^2 (1/\tau_r - j(2-s)\omega_1)} - \frac{L_m}{L_D} \right] \frac{U_{s2}^- e^{j\alpha}}{j\omega_1} \\ B_{s2}^- = \left[\frac{L_r}{L_D} - \frac{R_r L_m^2}{L_D^2 (j\omega_1 - 1/\tau_s + 1/\tau_r - j(2-s)\omega_1)} \right] \frac{U_{s2}^- e^{j\alpha}}{j\omega_1} \\ C_{s2}^- = \left[\frac{R_r L_m^2 (1/\tau_s - j\omega_1)}{L_D (1/\tau_r - j(2-s)\omega_1)(1/\tau_r - j(2-s)\omega_1 + j\omega_1 - 1/\tau_s)} \right] \frac{U_{s2}^- e^{j\alpha}}{j\omega_1} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} A_{s_rsc} = \frac{1}{L_s} \left(\frac{(1-k)u_s}{j\omega_1} - L_m i_{r.ref} \right) \\ B_{s_rsc} = \frac{-\beta_r L_m k u_s / L_s}{j\omega_1 \left[(j\omega_1 + 1/\tau_s)^2 - \beta_1 (j\omega_1 + 1/\tau_s) + \beta_2 \right]} + \frac{k u_s}{j\omega_1 L_s} \\ C_{s_rsc} = \frac{L_m}{L_s} \frac{i_{r.ref}}{1/\tau_1 - 1/\tau_2} \\ A_{r_rsc} = i_{r.ref} \\ B_{r_rsc} = \frac{\beta_r k u_s}{j\omega_1 \left[(j\omega_1 + 1/\tau_s)^2 - \beta_1 (j\omega_1 + 1/\tau_s) + \beta_2 \right]} \\ C_{r_rsc} = i_{r.ref} / (1/\tau_1 - 1/\tau_2) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta I_c^{\cos} = C_s \left(e^{-\frac{T}{2\tau_c}} - e^{\frac{T}{2\tau_c}} \right) \frac{\left[\cos(\lambda\pi)(\lambda+1)\omega_1 + \tau_c \sin(\lambda\pi) \right] \left[\omega_1^2 (\lambda^2 + 1) + \tau_c^2 \right]}{\left[(\lambda-1)^2 \omega_1^2 + \tau_c^2 \right] \left[(\lambda+1)^2 \omega_1^2 + \tau_c^2 \right]} \\ \Delta I_c^{\sin} = 4\pi C_s e^{-\frac{T}{2\tau_c}} \frac{4\pi^2 \sin(\lambda\pi)(1 + e^{\frac{T}{\tau_c}}) + T^2 (\sin(\lambda\pi)(\tau_c^2 - \omega_1^2)(1 + e^{\frac{T}{\tau_c}}))}{T^4 (\tau_c^2 + \omega_1^2) + 8\pi^2 T^2 (\tau_c^2 - \omega_1^2) + 16\pi^4} = \\ \frac{2\tau_c \omega_1 \cos(\lambda\pi)(1 - e^{\frac{T}{\tau_c}})}{T^4 (\tau_c^2 + \omega_1^2) + 8\pi^2 T^2 (\tau_c^2 - \omega_1^2) + 16\pi^4} \\ I_{c0} = A_c \\ \Delta I_c = \sqrt{A_c^2 + 2A_c (\Delta I_{\cos_c} \sin\varphi + \Delta I_{\sin_c} \cos\varphi) + (\Delta I_{\cos_c}^2 + \Delta I_{\sin_c}^2)} - A_c \\ \angle \Delta I_c = \arctan \left(\frac{A_c \sin\varphi + \Delta I_{\cos_c}^{\cos}}{A_c \cos\varphi + \Delta I_{\sin_c}^{\sin}} \right) - \angle I_c \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \Delta I_{s_rsc}^{\cos} = 4\pi C_{s_rsc} \left[\frac{1/\tau_1 (e^{2\tau_1} - e^{-2\tau_1})}{T^2 \tau_1^2 + 16\pi^2} - \frac{1/\tau_2 (e^{2\tau_2} - e^{-2\tau_2})}{T^2 \tau_2^2 + 16\pi^2} \right] \\ I_{s_rsc}^{\sin} = 8\pi^2 C_{rsc} \left[\frac{1/\tau_2 (e^{2\tau_1} - e^{-2\tau_1})}{T/\tau_1 (T^2 \tau_1^2 + 16\pi^2)} - \frac{1/\tau_1 (e^{2\tau_2} - e^{-2\tau_2})}{\tau_2 (T^2 \tau_2^2 + 16\pi^2)} \right] \\ I_{s_rsc0} = A_{s_rsc} \\ \Delta I_{s_rsc} = \sqrt{A_{s_rsc}^2 + 2A_{s_rsc} (\Delta I_{s_rsc}^{\cos} \sin\varphi + \Delta I_{s_rsc}^{\sin} \cos\varphi) + (\Delta I_{s_rsc}^{\cos}^2 + \Delta I_{s_rsc}^{\sin}^2)} - A_{s_rsc} \\ \angle \Delta I_{s_rsc} = \arctan \left(\frac{A_{s_rsc} \sin\varphi + \Delta I_{s_rsc}^{\cos}}{A_{s_rsc} \cos\varphi + \Delta I_{s_rsc}^{\sin}} \right) - \angle I_{s_rsc} \end{cases} \quad (5)$$

参考文献

- [1] 马瑞, 罗心仪, 肖麟祥. 基于随机模糊机会约束的主动配电网分布式风电双层规划模型[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3): 46-55.
MA Rui, LUO Xinyi, XIAO Linxiang. Distributed wind power bi-level programming model for active distribution network based on stochastic fuzzy chance constraint[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 46-55.
- [2] 刘卫东, 李奇南, 王轩, 等. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 55-71.
LIU Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind farms[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 55-71.
- [3] 时智勇, 王彩霞, 李琼慧. "十四五"中国海上风电发展关键问题[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 7-17.
SHI Zhiyong, WANG Caixia, LI Qionghui. Key issues of China's offshore wind power development in the "14th Five-Year Plan"[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 7-17.
- [4] 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.
- [5] 杨楠, 崔伟, 王智伟, 等. 含风电特高压直流系统单极接地故障暂态特性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 142-149, 157.
- YANG Nan, CUI Wei, WANG Zhiwei, et al. Research on transient characteristics of monopolar grounding fault for wind power integrated UHVDC[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 142-149, 157.
- [6] 党存禄, 李永强, 杨海兰, 等. 含风电场的输电网运营效率评估[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 77-86.
- DANG Cunlu, LI Yongqiang, YANG Hailan, et al. Efficiency evaluation of transmission grids with wind farms[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 77-86.
- [7] 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.
- [8] 张太升, 韩伟, 杨霖, 等. 基于波形相关分析的双馈风电场送出线时域距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 82-88.
- ZHANG Taisheng, HAN Wei, YANG Lin, et al. Time-domain distance protection for transmission lines of doubly-fed wind farms based on waveform correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 82-88.
- [9] JAFARIAN P. Improvement of security of transformer differential protection in breaker-and-a-half substations[C] // The 14th International Conference on Protection and Automation of Power Systems (IPAPS), December 31, 2019-January 1, 2020, Tehran, Iran.
- [10] 孙志辉, 郝万君, 曹松青, 等. 基于自适应广义滑模观测器的风力发电系统故障重构[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 123-130.
- SUN Zhihui, HAO Wanjun, CAO Songqing, et al. Fault reconstruction of a wind power system based on an adaptive generalized sliding mode observer[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 123-130.
- [11] 甘俊文, 邵能灵. 基于机端电压跌落深度的双馈风机自适应短路电流计算方法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3): 3-9.
- GAN Junwen, TAI Nengling. Research on adaptive short circuit current calculation of DFIG considering the terminal voltage dip[J]. Journal of Power Science and Technology, 2018, 33(3): 3-9.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] ZHAO Wenjing, SHANG Liqun, SUN Jinfan. Power quality disturbance classification based on time-frequency domain multi-feature and decision tree[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 337-342.
- [15] 成和祥. 基于双馈风机短路特性的风电场集电线路继电保护整定方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 93-99.
- CHENG Hexiang. Discussion on setting scheme of collecting line relay protection in wind farm based on a DFIG short-circuit characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 93-99.
- [16] 陈争光, 周泽昕, 王兴国, 等. 基于双树复小波变换的混合直流输电线路行波保护方法[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3832-3840.
- CHEN Zhengguang, ZHOU Zexin, WANG Xingguo, et al. Traveling wave protection for hybrid HVDC transmission lines based on dual-tree complex wavelet transform[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3832-3840.
- [17] 古一灿, 唐文虎, 辛妍丽, 等. 基于多尺度数学形态学和高低频能量比值的海上风电场内部瞬态过电压特征分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1702-1712, 17.
- GU Yican, TANG Wenhui, XIN Yanli, et al. Feature analysis for transient overvoltage in offshore wind farm based on high and low frequency energy rate using multi-scale mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1702-1712, 17.
- [18] DAUBECHIES I, LU J, WU H. Synchrosqueezed wavelet transforms: an empirical mode decomposition like-tool[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis,

- 2011, 30(2): 243-261.
- [19] 段建东, 李浩, 雷阳, 等. 利用同步挤压小波变换的高压交直流混联系统交流线路暂态方向保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3833-3841.
DUAN Jiandong, LI Hao, LEI Yang, et al. Transient-based directional protection using synchrosqueezing wavelet transforms for AC transmission lines in HVAC/DC hybrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3833-3841.
- [20] 喻敏, 王斌, 王文波, 等. 基于同步挤压小波变换的电力系统时变谐波检测[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊1): 50-57.
YU Min, WANG Bin, WANG Wenbo, et al. Power system time-varying transient harmonics detection based on SWT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 50-57.
- [21] NADOUR M, ESSADKI A, NASSER T. Improving low-voltage ride-through capability of a multimegawatt DFIG based wind turbine under grid faults[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(4): 370-382.
- [22] 金晶. 双馈风电机组转子变流器对短路特性的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
JIN Jing. Studies on the influence of rotor converter of double-fed induction wind turbine on short circuit characteristics[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [23] 范小红, 孙士云, 王春又, 等. 适应于双馈风电场送出线不对称故障的时域距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 48(23): 82-91.
FAN Xiaohong, SUN Shiyun, WANG Chunyou, et al. Time domain distance protection for asymmetric faults of an outgoing line in doubly-fed wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2019, 48(23): 82-91.
- [24] 靳现林, 蔡晓宇, 刘其辉. 一种考虑 RSC 和 GSC 的双馈风机短路电流实用计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 23-30.
JIN Xianlin, CAI Xiaoyu, LIU Qihui. A practical calculation method for short-circuit current of DFIG considering RSC and GSC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 23-30.
- [25] 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.
FAN 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.
- [26] 孙德娟, 孙士云, 范小红, 等. 基于励磁电感计算的双馈风电场送出变差动保护[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 395-407.
SUN Dejuan, SUN Shiyun, FAN Xiaohong, et al. Doubly-fed wind farm outgoing transformer differential protection based on excitation inductance calculation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 395-407.
- [27] SINCHANA G S, PADAKI S, RAVI V, et al. Software implementation of FFT algorithms and analysis of their computational complexity[C] // 2018 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECCOT), December 14-15, 2018, Mysuru, India.
- [28] 翁汉琰, 贾永波, 李振兴, 等. 二维空间重构电流特征轨迹的变压器差动保护判据[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 144-150.
WENG Hanli, JIA Yongbo, LI Zhenxing, et al. Transformer differential protection criterion based on reconstructed trajectory of current characteristics in two-dimensional space[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 144-150.
- [29] 朱永强, 张泉, 刘康, 等. 交直流混合微电网分段协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(6): 52-58.
ZHU Yongqiang, ZHANG Quan, LIU Kang, et al. Segmented coordination control strategy for hybrid AC/DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(6): 52-58.

收稿日期: 2021-09-06; 修回日期: 2021-10-25

作者简介:

杨兴雄(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电技术及其继电保护策略研究; E-mail: 1378808105@qq.com

曲延滨(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为风力发电控制技术 & 电力电子与电力传动。E-mail: quyanbin@hit.edu.cn

(编辑 葛艳娜)