

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201565

基于阻抗复数平面的自适应距离保护方案应用中的正则性问题研究

李大凤, 张广斌, 杨毅, 黄柯昊, 岳清, 赵伟

(昆明理工大学, 云南 昆明 650500)

摘要: 当双馈风电场送出线发生短路故障时, 基于傅里叶算法的传统距离保护受双馈风机频偏特性以及过渡电阻的影响, 保护动作性能较差。因此, 通过分析保护安装处测量阻抗与故障点阻抗的关系, 采用一种抗过渡电阻的新型自适应距离保护。针对该保护中出现的病态化问题, 采用正则化处理病态表达式, 在线修改自适应系数使保护的動作边界随自适应系数动态调整。最后, 基于 Matlab/Simulink 平台搭建双馈风机电磁暂态仿真模型, 考虑不同风电场规模和风速变化, 对比分析传统距离保护和自适应距离保护的動作特性。结果表明自适应距离保护的動作性能较好, 可靠性更高。

关键词: 双馈风机; 频偏特性; 过渡电阻; 整定值; 自适应距离保护

Research on regularity of adaptive distance protection scheme based on impedance complex plane

LI Dafeng, ZHANG Guangbin, YANG Yi, HUANG Kehao, YUE Qing, ZHAO Wei
(Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Traditional distance protection based on a Fourier algorithm is affected by the frequency offset characteristics and transition resistance of a Doubly Fed Induction Generator (DFIG) when the short-circuit fault occurs in the outgoing line of a doubly fed wind turbine. Protection action performance is poor. Therefore, by analyzing the relationship between the measured impedance and the fault point impedance, a new adaptive distance protection with resistance to transition resistance is adopted in this paper. Given that there is an ill-conditioned problem in the protection, regularization is used to deal with the ill-conditioned expression. The adaptive coefficient is modified online to make the action boundary of the protection adjust dynamically with the adaptive coefficient. Finally, based on the Matlab/Simulink platform, an electromagnetic transient simulation model of a DFIG is built. Considering different wind farm scale and wind speed changes, the operational characteristics of traditional and adaptive distance protection are compared and analyzed. The results show that the operational performance of adaptive distance protection is better and the reliability is higher.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52037003).

Key words: DFIG; frequency offset characteristics; transition resistance; setting value; adaptive distance protection

0 引言

近年来, 风力发电在世界各国飞速发展, 双馈风力发电机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)作为主流机型之一, 其定子直接与电网相连, 可向电网输送电能, 其转子通过一组换流器与电网连接,

既可向电网输送功率也可从电网吸收功率^[1-2]。DFIG并网运行, 送出线上发生短路故障时, 受风机频偏特性以及过渡电阻的影响, 基于傅里叶算法的传统距离保护動作性能较差^[3-7]。因此, 研究适用于DFIG送出线的距离保护具有重要意义。

目前, 国内外学者对DFIG故障特性、短路电流特性及送出线保护做了大量的研究。文献[8]分析了双馈风机短路电流特性, 并推导了短路电流中转速频率分量导致全周傅里叶算法产生误差的表达式; 文献[9]考虑到双馈风机送出线保护采用全周傅

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52037003); 云南省重大专项资助“基于多维度大数据的辐射配电网故障检测与定位研究”(202002AF080001)

里叶算法的弊端,提出一种基于瞬时值的全微分算法,该算法能准确计算出实际的故障距离;文献[10-11]针对双馈风机频偏特性和过渡电阻产生测量误差导致传统距离保护不能正确动作的问题,提取保护安装处不受频偏影响的全量信息进行参数辨识,然后根据辨识的参数计算出准确的测量阻抗,使距离保护正确动作。双馈风电场送出线和常规输电线路上的自适应距离保护大多根据系统的网络结构、故障特性、参数特征以及测量阻抗与过渡电阻的关系,构成动作特性较好的保护方案。文献[12-13]对风电场故障后的电压电流进行频谱分析,并考虑非工频分量对测量阻抗的影响,提出了适用于双馈风电场联络线的自适应距离保护;文献[14]根据双馈风机发生短路故障投入撬棒后,系统的正序阻抗与负序阻抗不相等的特征,对分支系数进行自适应整定,构成自适应距离保护;文献[15]分析了过渡电阻对距离保护的影响以及具有抗过渡电阻能力的继电器研究成果,对距离保护的发展方向做了相应的展望;文献[16]对常规输电线路距离保护展开了研究,利用线路保护安装处测量阻抗与过渡电阻的关系,提出了在线计算整定值的自适应距离保护;文献[17]提出了一种基于神经网络的自适应距离保护方案,该方案根据计算出的过渡电阻值自动调整整定值的大小;文献[18]仅利用风场侧的实时电气量动态调整保护动作边界构成自适应距离保护方案;文献[19]对实际超高压线路距离保护拒动而导致故障范围扩大的事故做了相关分析,提出了基于非最严苛电网运行方式下的整定方案。

以上文献对常规输电线路以及双馈风电场送出线的自适应距离保护做了大量的研究。但大多自适应距离保护判据中都含有三角函数比值的表达式,该表达式很容易出现病态化问题,而关于病态化的分析以及解决措施,鲜有文献报道。本文针对DFIG送出线经过渡电阻发生短路故障,传统距离保护不能正确动作的问题,采用在线计算整定值的自适应距离保护来改善保护的動作特性,并使用正则化方法处理病态化问题。最后,基于仿真软件Matlab/Simulink平台搭建双馈风机电磁暂态仿真模型验证该保护方案的正确性。

1 DFIG 短路电流特性及过渡电阻对距离保护的影响

1.1 DFIG 短路电流特性对傅里叶算法的影响

1) 短路电流特性

系统发生短路故障导致DFIG机端电压严重跌

落时,转子侧投入Crowbar保护电路,此时,静止坐标系下对称故障和不对称故障电流的表达式为(故障电流初相角为零)^[20-21]

$$\begin{cases} \dot{I}_{sy} = Ae^{j\omega_1 t} + Be^{-j\omega_1 t} + Ce^{-t/\tau_s} + D_{sy} e^{j\omega_1 t} e^{-t/\tau_r} \\ \dot{I}_{asy} = Ae^{j\omega_1 t} + Be^{-j\omega_1 t} + Ce^{-t/\tau_s} + D_{asy} e^{j\omega_1 t} e^{-t/\tau_r} \end{cases} \quad (1)$$

式中: \dot{I}_{sy} 为对称短路电流; \dot{I}_{asy} 为不对称短路电流; A 、 B 、 C 分别为正序基频分量系数、负序基频分量系数、衰减直流分量系数; D_{sy} 、 D_{asy} 分别为对称故障和不对称故障时的转速分量系数; ω_1 、 ω_r 分别为同步转速、转子转速; τ_s 、 τ_r 分别为定子时间衰减系数和转子时间衰减系数;相应参数的表达式见附录I。

2) DFIG 短路电流特性对傅里叶算法的影响

DFIG提供的短路电流包含了基频分量、暂态直流分量和衰减转速频率分量。在利用傅里叶算法提取工频分量时,可通过差分滤波滤除直流分量,因此,傅里叶算法提取的短路电流工频量中主要包含了基频分量和转速频率分量。短路电流信号 $f(x)$ 经傅里叶算法后的正弦系数 I_{sin} 和余弦系数 I_{cos} 为^[22]

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

式中: N 为基频周期内的采样点数; Δt 为数据采集点之间的时间间隔。

经傅里叶算法提取后,短路电流的幅值和相位表达式为

$$\begin{cases} |I| = \sqrt{I_{cos}^2 + I_{sin}^2} = I_c + \Delta I_c \\ \angle |I| = \arctan\left(\frac{I_{cos}}{I_{sin}}\right) = \angle \varphi_c + \Delta \varphi_c \end{cases} \quad (3)$$

式中: $|I|$ 、 $\angle |I|$ 为经傅里叶算法提取的短路电流的幅值和相角; I_c 、 ΔI_c 、 $\Delta \varphi_c$ 的详细表达式见附录II。

由式(3)可知,受转速频率分量的影响,短路电流的幅值和相角经傅里叶算法提取后存在一定的误差 ΔI_c 、 $\Delta \varphi_c$ 。

1.2 测量阻抗误差分析

基于1.1节的分析,考虑过渡电阻对传统距离保护的影响,DFIG送出线经过渡电阻发生短路故障网络图如图1所示,送出线mn上k点经过渡电阻发生短路故障,保护1为mn线路靠近m母线的距离保护,以下分析以保护1为例进行说明。

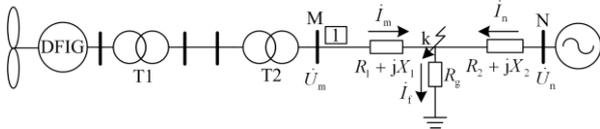


图 1 双馈风机送出线短路故障网络图

Fig. 1 Short circuit fault network diagram of doubly fed fan outgoing line

保护 1 的测量阻抗可由测量电压 \dot{U}_m 和测量电流 i_m 的比值获取。

$$Z_m = \frac{\dot{U}_m}{i_m} \quad (4)$$

由 1.1 节分析可知, 傅里叶算法提取电压电流工频分量存在一定的误差, 在此基础上, 分析过渡电阻对测量阻抗的影响。此时, 保护 1 的测量阻抗可表示为

$$Z_m = (R_1 + jX_1) + R_g \left(\frac{i_m + i_n}{i_m} \right) \quad (5)$$

将傅里叶算法提取的电流表达式(3)代入式(5)中, 可进一步得到风场侧送出线保护 1 的测量阻抗 Z_m 。

$$Z_m = (R_1 + jX_1) + R_g \left(1 + \frac{i_n}{i_c + \Delta I_c} \right) = Z_f + \Delta Z \quad (6)$$

式中: Z_f 为保护安装处到故障点的有效阻抗; ΔZ 为附加阻抗。

由式(6)可知, 风机送出线保护 1 的测量阻抗同时受傅里叶算法提取误差和过渡电阻的影响, 测量值中存在附加阻抗 ΔZ , 导致距离保护的动作性能较差。

1.3 传统距离保护仿真

为分析传统距离保护在风电场送出线上的动作特性, 基于 Matlab/Simulink 平台建立图 2 所示的双馈风机电磁暂态仿真模型。风电场有 6 台风机, 每台风机的额定容量为 1.5 MW, 额定电压为 0.575 kV, 风机经箱变(0.575/35 kV)连接到 35 kV 的母线上, 再经主变(35/120 kV)与电网相连; 送出线

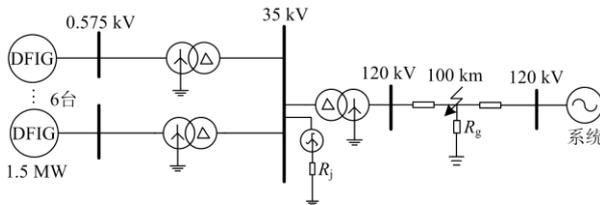


图 2 双馈风机并网运行模型图

Fig. 2 Grid connected operation model of doubly-fed induction generator

总长为 100 km, 线路参数: 单位长度正序电阻、正序电感分别为 0.115 3 Ω /km、1.05 mH/km, 单位长度零序电阻、零序电感分别为 0.413 Ω /km、3.32 mH/km。

以整定范围为线路全长 80% 的距离保护 I 段为研究对象, 风电场送出线在 0.3 s 发生金属性短路和经过渡电阻短路时, 保护的動作情况如图 3 所示。

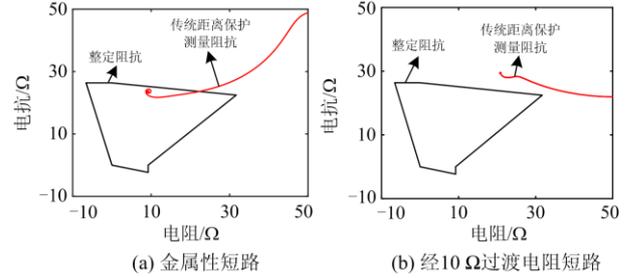


图 3 送出线动作边界处发生单相接地短路保护动作情况

Fig. 3 Single phase grounding short circuit protection action occurs at the action boundary of outgoing line

由图 3 可知: DFIG 送出线动作边界处发生金属性单相接地短路时, 保护正确动作; 动作边界处经 10 Ω 过渡电阻发生单相短路时, 保护不能正确动作。其他故障类型下的传统距离保护动作情况如表 1 所示。

表 1 不同故障类型下传统距离保护动作情况

Table 1 Action of traditional distance protection under different fault types

短路类型	故障距离/km	不同过渡电阻下保护动作情况		
		动作(√) 不动作(×)		
		可能拒动(↖)	可能误动(↗)	
		0 Ω	10 Ω	50 Ω
三相短路	45	√	√	√
	75	↖	↖	↖
	85	×	×	×
单相接地	45	√	√	×
	75	√	×	×
	85	↗	×	×
两相相间	45	√	×	×
	75	√	×	×
	85	×	×	×
两相接地	45	√	√	×
	75	√	×	×
	85	↗	×	×

由表 1 可知: 送出线区内近端发生金属性短路时, 所有短路故障类型下, 基于傅里叶算法的传统距离保护都能正确动作; 区内近端经 10 Ω 过渡电阻发生短路故障时, 除两相相间短路故障类型外, 其他短路故障类型下, 保护都能正确动作; 区内近

端经 50Ω 过渡电阻发生短路故障时, 除三相短路故障类型外, 其他短路故障类型下, 保护都不能正确动作。送出线区内远端发生金属性短路时, 三相短路故障类型下, 保护可能拒动, 其他短路故障类型下, 保护都能正确动作; 区内远端经 10Ω 和 50Ω 过渡电阻发生短路时, 三相短路故障时, 保护可能拒动, 其他故障类型下, 保护都不能正确动作。送出线区外发生金属性短路时, 单相接地和两相接地故障类型下, 保护可能会误动; 区外经过渡电阻发生短路时, 保护可靠不动作。由此可见, 基于傅里叶算法的传统距离保护动作性能较差, 主要原因是受双馈风机频偏特性和过渡电阻的影响。

2 自适应距离保护方案

2.1 保护判据

由 1.2 节分析可知, 保护安装处测量阻抗受 DFIG 频偏特性和过渡电阻的影响存在附加阻抗 ΔZ , 导致传统距离保护动作性能较差。本文借鉴文献[16]中常规输电线路的自适应距离保护思想, 将其应用于 DFIG 送出线距离保护, 保护的判据如下所示:

第一象限动作方程

$$\begin{cases} R - X \cot \alpha_3 \leq NR_{set} \\ X + R \cot \alpha_4 \leq NX_{set} \end{cases} \quad (7)$$

第二象限动作方程

$$\begin{cases} R \geq -X \tan \alpha_2 \\ X \leq NX_{set} \end{cases} \quad (8)$$

第四象限动作方程

$$\begin{cases} R \leq NR_{set} \\ X \geq -R \tan \alpha_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: N 定义为自适应系数; R_{set} 为整定电阻、 X_{set} 为整定电抗; R 、 X 为自适应距离保护测量值; 相关参数的具体表达式见附录 III; α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 为准四边形特性阻抗继电器中的相关角度, 如图 4 所示。

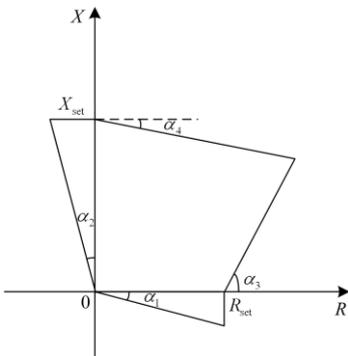


图 4 准四边形特性阻抗继电器

Fig. 4 Quasi quadrilateral characteristic impedance relay

图 4 中, 多边形包围的区域为保护动作区域, α_1 和 α_2 的角度一般取为 14° , α_3 角度一般取为 45° , α_4 角度一般取为 7.1° [23]。

若式(7)一式(9)同时成立, 判定故障点位于保护范围内, 保护动作; 否则, 判定故障点位于保护范围外, 保护不动作。DFIG 送出线自适应距离保护具体流程如图 5 所示。

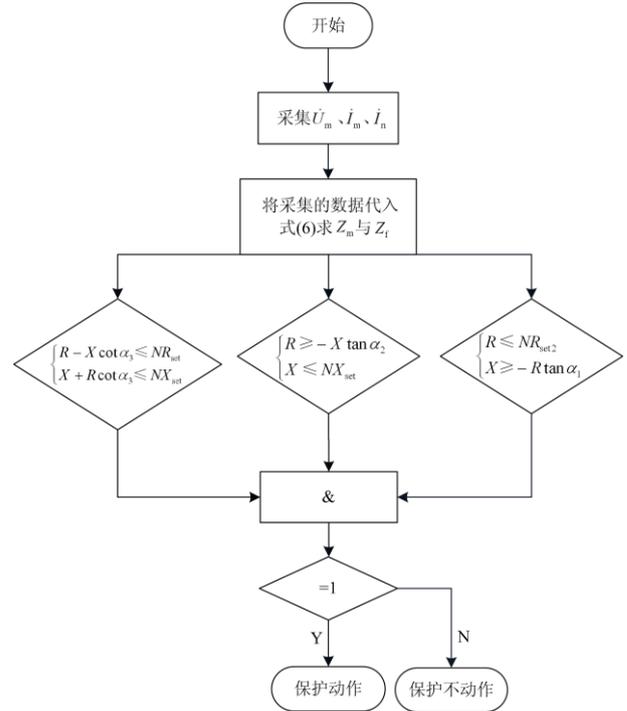


图 5 自适应距离保护流程图

Fig. 5 Flow chart of adaptive distance protection

图 5 中, 测量阻抗与有效阻抗的关系为

$$Z_f = MZ_m = (R + jX) \left| \frac{\sin \varphi_c}{\sin \varphi_b} \right| \quad (10)$$

式中, M 记为有效阻抗计算系数, 其具体表达式以及 φ_b 、 φ_c 计算式见附录 III。

2.2 正则化处理保护判据

1) 病态化

数据病态化是指输出结果对输入数据十分敏感, 输入数据的微小变化会引起输出结果较大的误差, 若一个问题同时满足以下两个条件[24]:

- a) 存在唯一解;
- b) 问题的解连续;

则该问题是良态问题, 反之为病态问题, 同理, 如果一个算法的结果出现过拟合的现象, 那么该算法是病态的。文中保护判据中的自适应系数 N 为两个正弦函数的比值, 当分母或分子的值无限接近零

时, 分子分母的比值极易出现病态化, 不能得到一个准确的整定值。因此, 本文采用正则化处理病态化表达式, 防止过拟合现象的出现。

2) 正则化

正则化是一种处理无限大、发散及不合理表达式的方法, 该方法通过优化误差函数, 防止过拟合, 使最终的解符合实际。本文在数据处理中主要采用 L2 正则, L2 正则的核心思想如下:

假设 $y_a(x)$ 为模型计算值, $y(x)$ 为真实数据,

$$y_a(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + \dots + a_nx^{n-1} \quad (11)$$

误差 $J(\theta)$ 为

$$J(\theta) = [y_a(x) - y(x)]^2 + \lambda [a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2] \quad (12)$$

式(12)中, λ 为控制正则化强度的常数, 可通过交叉验证选择一个恰当的值, 调整参数 a 的值, 可减小误差。非线性越强的参数, 对输出结果的影响更大, 则被修改得越多。病态化表达式经正则化处理后, 可输出一个理想结果。

3 自适应距离保护动作特性

为对比分析传统距离保护和自适应距离保护在风电场送出线上的动作特性以及验证本文方案的正确性, 基于 Matlab/Simulink 平台建立图 2 所示的双馈风机电磁暂态仿真模型。

3.1 I 段保护末端故障

DFIG 送出线动作边界处经 10Ω 过渡电阻发生单相接地短路故障时, 自适应系数 N 和整定阻抗的波形如图 6 所示。

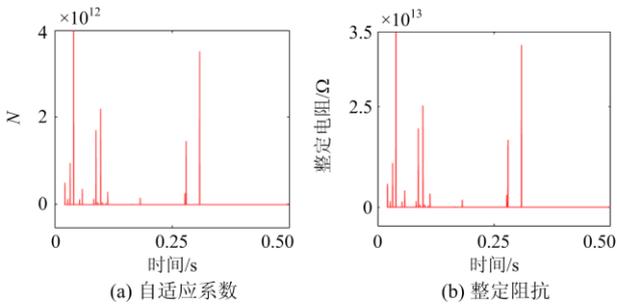


图 6 自适应系数和整定电阻波形

Fig. 6 Adaptive coefficient and setting impedance waveform

由图 6 可知, 自适应系数的波形出现了毛刺, 进而导致整定电阻的波形也出现了毛刺。为了削弱毛刺的影响, 借鉴正则化思想^[25-27]:

- 1) 最大限度减少变量的选取数量;
- 2) 削弱不重要的特征变量, 减少特征变量的数量级, 提取重要的特征向量。

DFIG 送出线发生故障时, 线路有效阻抗角不

会随过渡电阻的改变而改变。由式(6)可知, 当 $R_g = 0$ 时, 有效阻抗和测量阻抗相等, 即 $Z_m = Z_f$, 此时, $\varphi_s = \arg(Z_f) = \arg(Z_m)$ 。当送出线发生单相短路故障时, $\varphi_s = 68.5^\circ$, 自适应系数可进一步由式(13)表示。

$$N = \left| \frac{\sin \varphi_b}{\sin \varphi_c} \right| = \left| \frac{\sin(68.5^\circ - D_1 \varphi_z)}{\sin(D_2 \varphi_m + D_3 \varphi_z)} \right| \quad (13)$$

式中, D_1 、 D_2 、 D_3 为正则化参数。

结合正则化对自适应系数表达式中的特征量进行分析后, 取 $D_1 \approx 0$ 、 $D_2 \approx 0.4$ 、 $D_3 \approx 0$, $R_g = 10 \Omega$ 时, 经正则化后的自适应系数和整定阻抗的波形如图 7 所示。

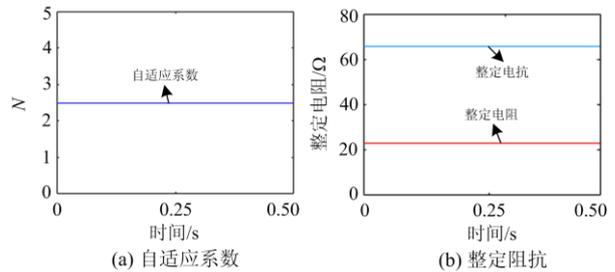


图 7 正则化后自适应系数和整定阻抗波形

Fig. 7 Adaptive coefficient and tuning impedance waveform after regularization

将经正则化后的自适应系数应用于自适应距离保护中, 当送出线动作边界处经 10Ω 和 50Ω 过渡电阻发生单相接地短路时, 传统距离保护和自适应距离保护的動作情况如图 8 和图 9 所示。

由图 8 和图 9 可知, DFIG 送出线 I 段保护末端经 10Ω 和 50Ω 过渡电阻发生单相接地短路时, 传统距离保护不能正确动作, 而采用自适应距离保护, 保护正确动作。

送出线经 0Ω 、 10Ω 、 50Ω 过渡电阻发生单相接地短路故障时, 自适应距离保护的相关自适应参数以及動作情况如表 2 所示。

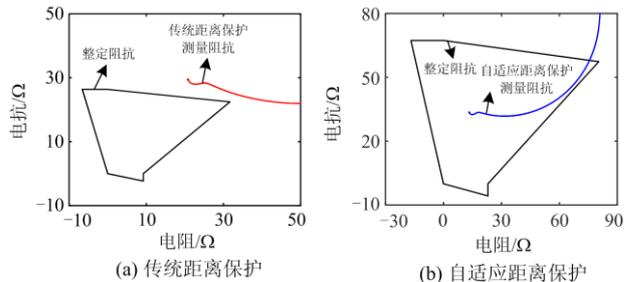


图 8 经 10Ω 过渡电阻发生单相接地短路时保护动作情况

Fig. 8 Protection action when single-phase ground short circuit occurs through 10Ω transition resistance

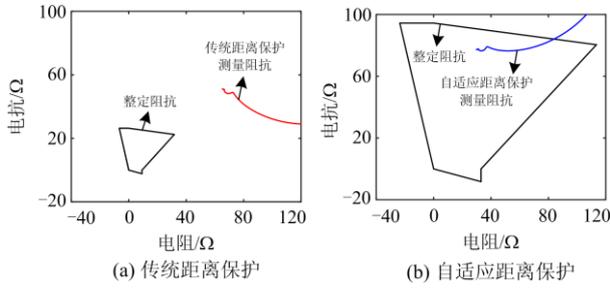


图9 经 50 Ω 过渡电阻发生单相接地短路时保护动作情况
Fig. 9 Protection action when single-phase ground short circuit occurs through 50 Ω transition resistance

表 2 单相接地短路时自适应距离保护动作情况
Table 2 Action of adaptive distance protection in single phase to ground short circuit

过渡电阻/Ω	N	整定电阻/Ω	整定电抗/Ω	动作情况
0	1.00	9.224	26.376	动作
10	2.49	23.000	65.680	动作
50	3.59	33.110	94.700	动作

由表 2 可知，DFIG 送出线在 I 段保护末端经 0 Ω、10 Ω、50 Ω 过渡电阻发生单相接地短路故障，自适应距离保护能正确动作。对比分析表 1 和表 2 可知，自适应距离保护具有抗过渡电阻能力，与传统距离保护相比，该保护的動作性能较好。

3.2 I 段保护区内故障

DFIG 送出线 70 km 处经 10 Ω 过渡电阻发生两相相间短路时，有效阻抗 $\varphi_s = 70.6^\circ$ ，自适应系数表达式经正则化后， $D_1 \approx 0$ 、 $D_2 \approx 0.8$ 、 $D_3 \approx 0$ ，保护动作情况如图 10 所示。

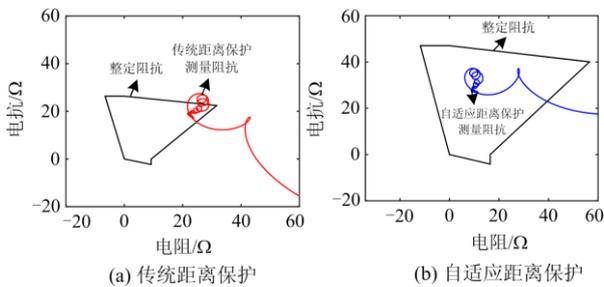


图 10 经 10 Ω 过渡电阻发生两相相间短路时保护动作情况

Fig. 10 Protection action in case of phase to phase short circuit through 10 Ω transition resistance

由图 10 可知，DFIG 送出线 70 km 处经 10 Ω 过渡电阻发生两相相间短路时，传统距离保护不能正确动作，而采用自适应距离保护，保护正确动作。

送出线 70 km 处经 0 Ω、10 Ω、50 Ω 过渡电阻发生两相相间短路时，自适应距离保护的相关自适应参数以及动作情况如表 3 所示。

表 3 两相相间短路时自适应距离保护动作情况

Table 3 Action of adaptive distance protection in case of phase to phase short circuit

过渡电阻/Ω	N	整定电阻/Ω	整定电抗/Ω	动作情况
0	1.00	9.224	26.376	动作
10	1.78	16.420	46.950	动作
50	12.05	111.200	317.900	不动作

由表 3 可知，送出线 70 km 处经 0 Ω、10 Ω 过渡电阻发生两相相间短路时，保护正确动作，而过渡电阻为 50 Ω 时，保护不能正确动作。对比分析表 1 和表 3，可知自适应距离保护具有抗过渡电阻能力，与传统距离保护相比，该保护的動作性能较好。

综上所述，自适应距离保护具有抗过渡电阻能力，且该保护的動作性能比传统距离保护動作性能好。

3.3 自适应距离保护方案适应性分析

为进一步分析自适应距离保护方案在风电场送出线上应用的适应性，考虑不同运行工况以及无功补偿运行条件下自适应距离保护的動作性能。

1) 不同风速

在图 2 所示的风电场仿真系统中，风电场送出线在 6 m/s、10 m/s、14 m/s 风速下经 10 Ω 过渡电阻发生单相接地短路故障和两相相间故障时，自适应距离保护的動作情况如图 11—图 13 所示。

由图 11—图 13 可知，距保护安装处 45 km 处(区内近端)和 75 km 处(区内远端)在不同风速下经 10 Ω 过渡电阻发生单相接地和两相相间故障时，自适应整定值随风速改变而调整，保护都能正确动作；当风速为 6 m/s 时，自适应保护動作区域最小，风速为 14 m/s 时，自适应保护動作区域最大，风速越大，保护動作区域越大；对比分析单相接地故障和两相相间故障的動作特性可知，风速对两相相间故

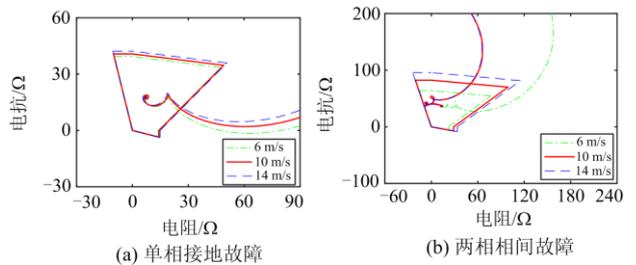


图 11 距保护安装处 45 km 处发生短路故障时保护动作情况
Fig. 11 Protection action in case of short circuit fault 45 km

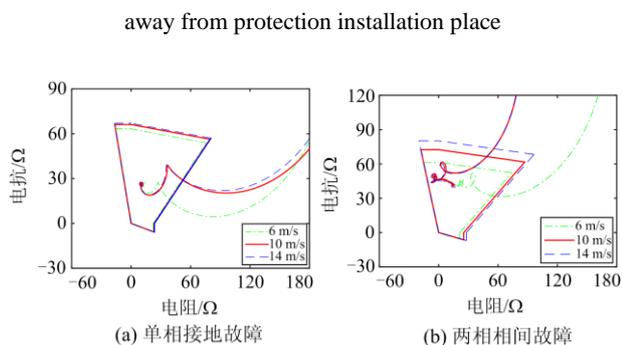


图 12 距保护安装处 75 km 处发生短路故障时保护动作情况
Fig. 12 Protection action in case of short circuit fault 75 km away from protection installation place

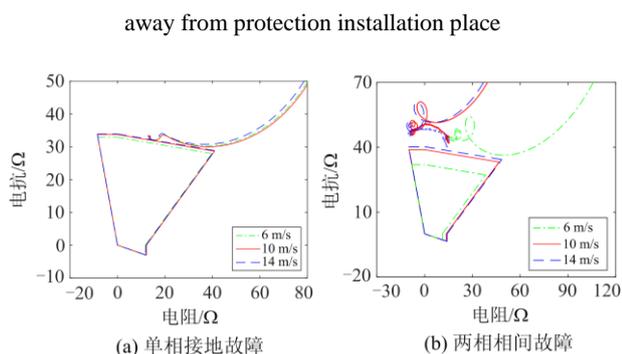


图 13 距保护安装处 85 km 处发生短路故障时保护动作情况
Fig. 13 Protection action in case of short circuit fault 85 km away from protection installation place

障的影响更大。距保护安装处 85 km 处(区外)经 10 Ω 过渡电阻发生单相接地和两相相间故障时, 如图 13(a)和图 13(b)所示, 保护不动作。

2) 不同风场容量和电压等级

图 2 所示的风电场仿真系统中, 风电场的容量增加为 30 MW(风机台数为 20 台), 网侧电压等级降为 110 kV, 在此系统下仿真验证自适应保护方案的适应性。

以整定范围为线路全长 80%的距离保护 I 段为研究对象。在不同的风速下, 风电场送出线在 0.3 s 分别经 10 Ω 和 50 Ω 过渡电阻发生单相接地故障时, 自适应距离保护的動作情况如图 14—图 16 所示。

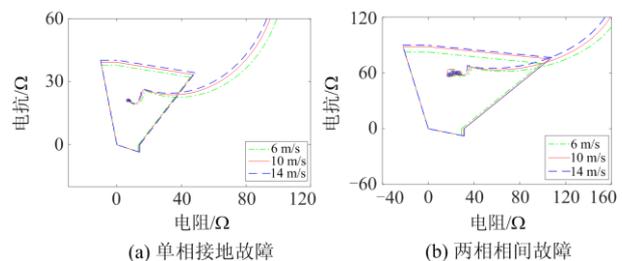


图 14 距保护安装处 45 km 处保护动作情况

Fig. 14 Protection action at 45 km away from the protection installation site

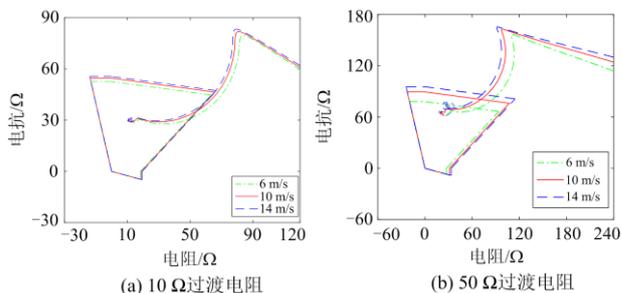


图 15 距保护安装处 75 km 处保护动作情况

Fig. 15 Protection action at 75 km away from the protection installation site

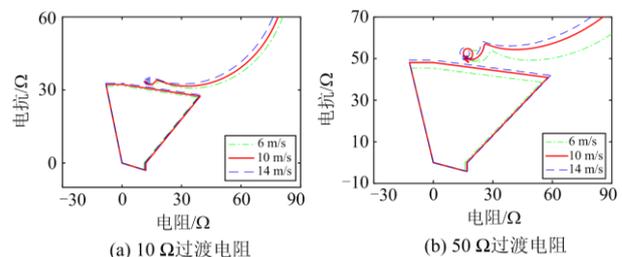


图 16 距保护安装处 85 km 处保护动作情况

Fig. 16 Protection action at 85 km away from the protection installation site

由图 14—图 16 可知, 在不同风速下: 距保护安装处 45 km 处(区内近端)、75 km 处(区内远端)分别经 10 Ω 和 50 Ω 过渡电阻发生单相接地故障时, 保护都能正确动作; 距保护安装处 85 km(区外)在不同风速下经 10 Ω 和 50 Ω 过渡电阻发生单相接地故障时, 保护不动作。

双馈风电场送出线在不同运行工况下的保护动作情况如表 4 所示。

由表 4 可知, 当不同规模的风电场送出线在不同风速下经过渡电阻发生接地短路故障和相间短路故障时, 自适应距离保护具有一定的抗过渡电阻能力, 保护的動作性能较好。

3) 无功补偿

在图 2 所示的风电场仿真系统中, 0.575/35 kV 变压器的高压侧母线上配置 SVG 无功补偿装置。以单相接地为例, 送出线 85 km 处(区外)发生金属性单相接地故障, 保护动作情况如图 17 所示; 送出线 75 km 处(区内)经 10 Ω 和 50 Ω 过渡电阻发生单相接地故障, 保护动作情况如图 18、图 19 所示。

由图 17 可知, 送出线发生区外金属性故障时,

传统距离保护误动，而自适应距离保护正确动作；由图 18 和图 19 可知，送出线经 10 Ω 和 50 Ω 过渡电阻发生区内单相接地故障时，传统距离保护拒动，而自适应距离保护能正确动作。

表 4 不同运行工况下的自适应距离保护动作特性
Table 4 Operation characteristics of adaptive distance protection under different operating conditions

风场容量与网侧电压等级	故障类型	故障位置/km	过渡电阻/Ω	不同风速下保护的動作情况		
				動作(√)	不动作(×)	
				6 m/s	10 m/s	14 m/s
9 MW 与 120 kV	单相接地	45	10	√	√	√
			50	√	√	√
		75	√	√	√	
	两相相间	85	10	×	×	×
		45	10	√	√	√
		50	×	×	×	
30 MW 与 110 kV	单相接地	45	10	√	√	√
			50	√	√	√
		75	√	√	√	
	两相相间	85	10	×	×	×
		45	10	√	√	√
		50	×	×	×	
		85	10	×	×	×

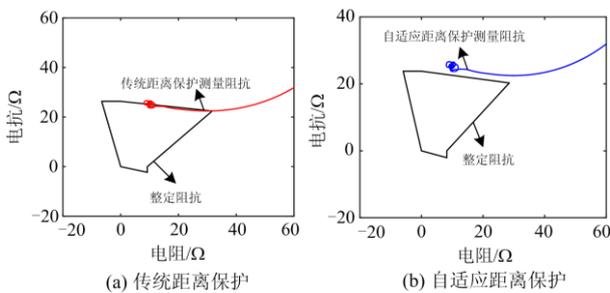


图 17 区外发生金属性故障保护动作情况

Fig. 17 Metal fault protection action outside the zone

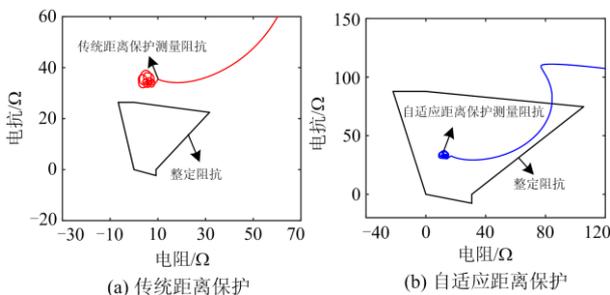


图 18 区内经 10 Ω 过渡电阻发生单相接地短路保护动作情况

Fig. 18 Protection action of inter-area single phase ground short circuit via 10 Ω transition resistance

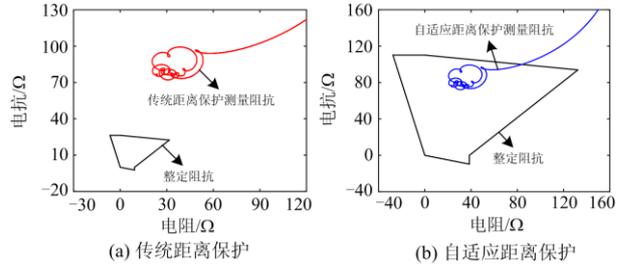


图 19 区内经 50 Ω 过渡电阻发生单相接地短路保护动作情况

Fig. 19 Protection action of inter-area single phase ground short circuit via 50 Ω transition resistance

由以上分析可知，不同规模的风电场在不同运行工况以及考虑无功补偿运行条件下，送出线上发生短路故障时，自适应距离保护能正确动作，并具有一定的抗过渡电阻能力。

4 结论

通过对比分析双馈风电场中传统距离保护和自适应距离保护的動作特性，最终得到以下结论：

- 1) 频偏特性以及过渡电阻导致基于傅里叶算法的传统距离保护的测量阻抗存在误差，导致传统距离保护的動作性能较差。
- 2) 双馈风电场送出线采用自适应距离保护时，结合正则化处理保护判据中的病态化问题，仿真效果明显，提高了保护的可靠性；经理论分析和仿真验证，自适应距离保护具有抗过渡电阻能力，与传统距离保护相比，保护的動作性能较好。

附录 I

$$A = \frac{L_r \vec{U}_s^p}{j\omega_1 M} + \frac{L_m A R_r \vec{U}_s^p}{j\omega_1 (j\omega_s + \frac{1}{T_r}) M}$$

$$B = -\frac{L_r \vec{U}_s^N}{j\omega_1 M} - \frac{L_m A R_r \vec{U}_s^N}{j\omega_1 (\frac{1}{T_r} + j(2-s)\omega_1) M}$$

$$C = \frac{L_r (\vec{U}_s - \vec{U}_{st}^p + \vec{U}_{st}^N)}{j\omega_1 M} + \frac{L_m A R_r (\vec{U}_s - \vec{U}_{st}^p + \vec{U}_{st}^N)}{j\omega_1 (-j\omega_r + \frac{1}{T_r} + \frac{1}{T_s}) M}$$

$$D_{sy} = -\frac{L_m}{M} \cdot \left[\frac{AR_t \vec{U}_{st}^{\rightarrow p}}{jw_r(jw_s + 1/T_r)} + \frac{AR_t (\vec{U}_s - \vec{U}_{st}^{\rightarrow p})}{jw_1(-jw_r + 1/T_r - 1/T_s)} + \right. \\ \left. \vec{\psi}_{r+}(0) \right]$$

$$D_{asy} = -\frac{L_m}{M} \cdot \left[\frac{AR_t \vec{U}_{st}^{\rightarrow p}}{jw_1(jw_s + 1/T_r)} + \frac{AR_t (\vec{U}_s - \vec{U}_{st}^{\rightarrow p})}{jw_1(-jw_r + 1/T_r - 1/T_s)} + \right. \\ \left. \vec{\psi}_{r+}(0) - \frac{AR_t \vec{U}_{s-}^{\rightarrow N}}{jw_1(-j(2-s)w_1 + 1/T_r)} + \right. \\ \left. \frac{AR_t \vec{U}_{s-}^{\rightarrow N}}{jw_1(-j(1-s)w_1 + 1/T_r - 1/T_s)} \right]$$

式中, $R_t = R_r + R_c$, 下标中的 c 表示计及 Crowbar 保护。

附录 II

$$I_c = A_1 + B_1$$

$$S_1 = A_1 \cos \varphi + B_1 \cos \varphi + \Delta I_{\cos}$$

$$S_2 = A_1 \sin \varphi + B_1 \sin \varphi + \Delta I_{\sin}$$

$$\Delta I_c = \sqrt{S_1^2 + S_2^2} - A_1 - B_1$$

$$\Delta \varphi = \arctan \frac{I_{\cos}}{I_{\sin}} - \angle \varphi_c$$

附录 III

$$\begin{cases} R = \operatorname{Re} \left(Z_m \frac{\cos \varphi_s + j \sin \varphi_s}{\cos \varphi_m + j \sin \varphi_m} \right) \\ X = \operatorname{Im} \left(Z_m \frac{\cos \varphi_s + j \sin \varphi_s}{\cos \varphi_m + j \sin \varphi_m} \right) \end{cases}$$

式中: $\varphi_m = \arg(Z_m)$; $\varphi_s = \arg(Z_f)$ 。

$$\begin{cases} \varphi_a = \varphi_s - \varphi_m \\ \varphi_b = 180^\circ - \varphi_s + \varphi_z \\ \varphi_c = \varphi_m - \varphi_z \end{cases}$$

$$N = \left| \frac{\sin \varphi_b}{\sin \varphi_c} \right|$$

$$M = \left| \frac{\sin \varphi_c}{\sin \varphi_b} \right| \frac{\cos \varphi_f + j \sin \varphi_f}{\cos \varphi_m + j \sin \varphi_m}$$

式中: 下标中的 a、b、c 代表不同的角度, 无物理意义; $\varphi_z = \arg(\Delta Z)$, 可由负序电流与故障点电流关系推导得出。

参考文献

[1] 邓王博, 王海云, 常喜强, 等. 大规模双馈风电场次同步振荡的成因分析[J]. 高压电器, 2019, 55(9): 215-221. DENG Wangbo, WANG Haiyun, CHANG Xiqiang, et al.

- Cause analysis on subsynchronous oscillation in large-scale doubly-fed wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 215-221.
- [2] 朱鑫要, 周前, 刘建坤, 等. 混合串补抑制双馈风电场次同步振荡研究[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 218-222, 229. ZHU Xinyao, ZHOU Qian, LIU Jiankun, et al. Research on hybrid series compensation for suppression of SSO in doubly fed wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 218-222, 229.
- [3] 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 doubly fed wind power generation system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [4] 朱华托. 并网双馈风机短路电流分析及其对送出线距离保护的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. ZHU Huatuo. Analysis of short circuit current of grid connected doubly fed wind turbine and its influence on distance protection of outgoing line[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [5] TUMMALA A S L V. A robust composite wide area control of a DFIG wind energy system for damping inter-area oscillations[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 260-269. DOI: 10.1186/s41601-020-00170-y.
- [6] 吴杰, 师庆丹, 李珊, 等. 考虑电缆选型双馈机组分散协调控制对风电场无功优化影响[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 113-119. WU Jie, SHI Qingdan, LI Shan, et al. The influence of decentralized and coordinated control of DFIG on reactive power optimization for wind farm considering cable selection[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 113-119.
- [7] 周步祥, 杨常. 基于实时计算光伏系统等效阻抗的自适应距离保护[J]. 电测与仪表, 2019, 56(5): 89-93. ZHOU Buxiang, YANG Chang. Adaptive distance protection based on equivalent impedance of real-time calculation PV system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(5): 89-93.
- [8] 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. Influence of frequency characteristics of doubly fed wind farm on distance protection[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9): 116-120.
- [9] 杨增力, 孔祥平, 王力军, 等. 适用于双馈风电场联络线的距离保护方案[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 252-260. YANG Zengli, KONG Xiangping, WANG Lijun, et al.

- Distance protection scheme for tie line of doubly fed wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 252-260.
- [10] 王春又, 束洪春, 孙士云, 等. 基于实测数据的双馈风电场集电线路时域距离保护[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(9): 113-121.
WANG Chunyou, SHU Hongchun, SUN Shiyun, et al. Time domain distance protection for collecting line of doubly fed wind farm based on measured data[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(9): 113-121.
- [11] 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. Influence of short circuit current characteristics on distance protection and protection strategy of doubly fed wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 18-27.
- [12] 严淮. 风电场接入电网的联络线保护方案研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
YAN Huai. Research on tie line protection scheme for wind farm connected to power grid[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [13] 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 affecting the distance protection of wind farm tie line and solutions[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1420-1424.
- [14] 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 grounding distance protection considering characteristics of doubly fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 124-133.
- [15] 裘愉涛, 马伟, 丁冬, 等. 提升距离保护抗过渡电阻能力的研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 166-176.
QIU Yutao, MA Wei, DING Dong, et al. Review of research on improving the resistance to transition resistance of distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 166-176.
- [16] 马静, 马伟, 闫新, 等. 基于阻抗复数平面的自适应距离保护方案[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 290-296.
MA Jing, MA Wei, YAN Xin, et al. Adaptive distance protection scheme based on impedance complex plane[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 290-296.
- [17] UZUBI U, EKWUE A, EJIUGU E. An adaptive distance protection scheme for high varying fault resistances: updated results[J]. Scientific African, 2020, 9.
- [18] 张华中, 王维庆, 朱玲玲, 等. 风电场联络线距离保护的自适应整定方法[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 89-93.
ZHANG Huazhong, WANG Weiqing, ZHU Lingling, et al. Adaptive setting method of tie line distance protection in wind farm[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 89-93.
- [19] 李怀强, 高露, 粟小华, 等. 基于非最严苛电网运行方式的超高压线路距离保护整定方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 166-172.
LI Huaiqiang, GAO Lu, SU Xiaohua, et al. Setting method of EHV line distance protection based on non most severe grid operation mode[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 166-172.
- [20] 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 fan[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 38-48.
- [21] 李菁, 郑涛, 赵裕童, 等. 双馈风电短路电流特性对距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 4(6): 37-47.
LI Jing, ZHENG Tao, ZHAO Yutong, et al. Impact of doubly-fed wind system short-circuit current characteristics on the transmission line distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 37-47.
- [22] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [23] 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, 2010.
- [24] 刘继军. 不适定问题的正则化方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [25] 韩波, 李莉. 非线性不适定问题的正则化方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [26] 武国宁, 胡汇丰, 于萌萌. 深度学习中的正则化方法研究[J]. 计算机科学与应用, 2020, 10(6): 1224-1233.
WU Guoning, HU Huiheng, YU Mengmeng. Research on regularization method in deep learning[J]. Computer Science and Application, 2020, 10(6): 1224-1233.
- [27] 程浩. 若干不适定问题的正则化方法研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
CHENG Hao. Research on regularization methods for some ill posed problems[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.

收稿日期: 2020-12-17; 修回日期: 2021-05-07

作者简介:

李大凤(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为风力发电及其对电力系统的影响; E-mail: 1142532557@qq.com

杨毅(1982—), 男, 通信作者, 硕士, 讲师, 研究方

向为电力系统运动与监控。E-mail: 44947434@qq.com

(编辑 葛艳娜)