

风电场送出线等传变距离保护

裘愉涛¹, 潘武略¹, 倪传坤², 何荷³, 文明浩³

(1. 浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000;
3. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 分析了具备低电压穿越(LVRT)能力的双馈式风电场送出线路故障暂态特性。风电送出线路风场侧保护测得的电压与电流主要频率分量不一致, 致使传统的依据工频电压、电流相量的距离保护元件动作性能受到严重影响, 无法正常工作。基于输电线路时域模型的解微分方程算法不涉及信号的频域信息, 可以克服送出线电压、电流主频不同带来的影响, 但受高频分量的影响较大。等传变距离保护相较传统的解微分方程算法, 增加了低通滤波及故障点电压重构两个环节, 显著改善了算法的测距性能。PSCAD/EMTDC 仿真结果表明, 线路不同位置处发生不同类型故障时, 等传变距离保护算法均可以实现快速、准确测距。

关键词: 风电场; 双馈感应发电机; 送出线; 解微分方程算法; 等传变距离保护

Equal transfer process-based distance protection for wind farm outgoing transmission line

QIU Yutao¹, PAN Wulue¹, NI Chuankun², HE He³, WEN Minghao³

(1. Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China; 2. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China;
3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology
(Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: The fault features of outgoing transmission line in DFIG-based wind plant with the capacity of low-voltage ride-through (LVRT) are analyzed. The main frequency inconsistency between voltage and current of wind farm outgoing transmission line leads a serious impact on the action performance of traditional distance protection element based on power frequency voltage and current phasor. The differential equation algorithm based on the time-domain differential equation model of transmission line does not involve the frequency-domain information of the signal, thus it is unaffected by the main frequency inconsistency between voltage and current of wind farm outgoing transmission line. But the high-frequency characteristic of the differential equation algorithm is poor. Compared with the traditional differential equation algorithm, two processes are gained in the equal transfer process-based distance protection, low-pass filtering and re-structuring of the voltage at the fault point, which significantly improves the performance of the algorithm. The PSCAD/EMTDC simulation results show that the distance element which employs the equal transfer process-based distance protection algorithm can trip correctly and quickly while unaffected by the wind power transient voltage and current no matter what kind of fault occurs in the protection scope.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477061 and No. 51077061).

Key words: wind plant; doubly fed induction generator (DFIG); outgoing transmission line; differential equation algorithm; equal transfer process-based distance protection

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)12-0061-06

0 引言

近年来, 随着电力电子技术的发展, 大量新型大容量风力发电机组开始投入运行, 风力发电迅速发展^[1-2]。2013年我国(不包括台湾地区)新增装

机容量 16 088.7 MW, 同比增长 24.1%; 累计装机容量 91 412.89 MW, 同比增长 21.4%。新增装机和累计装机两项数据均居世界第一^[3]。因此, 结合风电的特点, 研究风电并网对电力系统的影响具有至关重要的意义。

大型风电场多以双馈感应发电机(Doubly fed induction generator, DFIG)为主^[4-6], 且机组一般采

用单元接线方式, 并联分组后就地形成集约式风电场, 然后经过升压变压器, 通过送出线将电能输送至电网。风电场送出线作为风电场向电网输送功率的重要通道, 其运行安全对于风电场和电网的安全稳定运行都具有重大的意义。因此, 确保电网故障时双馈风电场送出线保护能够正确、可靠地动作对风电场和电网至关重要^[7-8]。

具备低电压穿越能力的双馈风电场送出线的故障特征显示, 仅在三相金属性故障情况下, 风电场侧电压与电流主频率相同, 其他故障情况下, 风电场侧保护的测量电压与电流的主频率均不同^[9], 其中保护测量处电流的主要频率分量随短路前机组的转速变化, 不再保持工频, 频率变化范围为 35~65 Hz, 而保护测量处电压的主要频率分量一般可由系统支撑维持工频^[10]。这与传统电网在故障期间的电磁暂态特性存在显著差异, 致使传统的依据工频电压、电流相量的距离保护元件的动作性能将会受到严重影响。例如文献^[10]指出, 工频傅氏算法用于风电场送出线距离保护时, 其提取所获得的电压、电流相量的旋转速度会变得不同, 致使经过幅值相位比较后获得的阻抗计算轨迹也会发生旋转, 从而产生极大的误差; 而基于线路时域 RL 模型的解微分方程算法可以克服风电场送出线保护安装处电压电流主频不同的影响。但是, 解微分方程算法的高频特性不足。为了克服上述问题, 提出将等传变距离保护算法^[11]应用于双馈式风电场送出线的距离保护中。本文从分析双馈式风电场送出线的故障特性入手, 通过 PSCAD 仿真平台对风电路继电保护的动作性能进行了研究。

1 双馈式风电场送出线故障特征分析

双馈式风电机组一般采用撬棒(Crowbar)保护电路实现低电压穿越。当电网发生故障导致转子电流过大或直流电容电压过高时, 撬棒保护断开转子侧变流器与转子绕组的连接, 并通过撬棒电阻短接转子绕组以旁路转子侧变流器^[12-17]。该阶段时间非常短暂, 线路保护来不及动作, 且电流、电压波形复杂, 此后 DFIG 失去励磁, 进而从发电机运行状态转变为电动机运行状态, 一直持续到故障消失, 撬棒电路退出。撬棒电阻的投入导致定、转子绕组之间的耦合显著增强, 使得 DFIG 的运行特性不同于传统同步发电机或异步电动机, 因此, 有必要针对撬棒保护动作情况下 DFIG 的故障特性进行研究。

图 1 所示为某总装机容量为 300 MW 的双馈式风电场, 风电场内部接线是每个 5 MW 机组通过单

机单变, 将其出口电压 0.69 kV 升高到 35 kV, 多台风电机组汇集到一条集电线路接入 35 kV 母线, 经风电场主变压器及 220 kV 风电场送出线到 220 kV 母线, 最后将电能送至系统。为简化起见, 暂不考虑风电场内部的汇流线路阻抗。

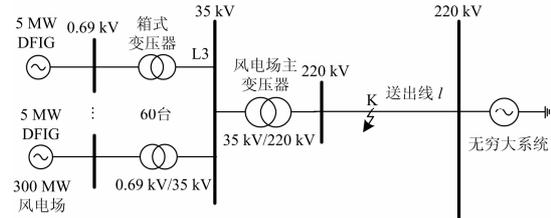


图 1 双馈式风电场系统图

Fig. 1 Schematic diagram of the DFIG wind farm system

在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态平台建立该双馈式风电场集中式接入仿真系统。系统主要参数如下: 风电机组, 额定容量 5 MW, 额定电压 0.69 kV, 转子额定转速 1.2 p.u., 定子电阻 $R_s=0.00756$ p.u., 定子漏感 $L_{s\sigma}=0.1425$ p.u., 转子电阻 $R_r=0.00533$ p.u., 转子漏感 $L_{r\sigma}=0.1425$ p.u., 励磁电感 $L_m=2.1767$ p.u., 其中所有电阻和电抗均为以机组自身额定值作为基准的标么值; 箱式变压器, 额定容量 7.5 MV·A, 额定电压 0.69 kV/35 kV, 正序漏抗 $X_{l\sigma}=0.0895$ p.u., 空载损耗 $P_0=0.00035$ p.u., 铜耗 $P_{cu}=0.0094$ p.u.; 风电场主变压器, 额定容量 450 MV·A, 额定电压 35 kV/220 kV, 正序漏抗 $X_{l\sigma}=0.0895$ p.u., 空载损耗 $P_0=0.00035$ p.u., 铜耗 $P_{cu}=0.0094$ p.u.; 220 kV 送出线路, 单位长度正序电阻 $r_1=0.019$ Ω /km, 正序电抗 $x_1=0.2463$ Ω /km, 正序电容 $c_1=14.8024$ nF/km, 零序电阻 $r_0=0.2079$ Ω /km, 零序电抗 $x_0=0.7758$ Ω /km, 零序电容 $c_0=8.703$ nF/km, 单位长度零序阻抗 $z_0=\Omega$ /km, 线路长度 $l=100$ km。

故障发生前 DFIG 处于额定运行状态, 转子转速为 1.2 p.u., 仿真在 $t=1$ s 时刻在风电场送出线路的中点处(50 km)发生三相短路, 过渡电阻为 1 Ω , 故障持续时间 0.1 s, 撬棒于 1.01 s 时投入, 得到风电场侧母线电压、风电场侧电流和系统侧电流分别如图 2 和图 3 所示。

由仿真结果可以看出, 撬棒保护动作后, 风场侧保护安装处测量得到的三相故障电流中的交流分量迅速衰减, 且其频率与风场侧保护安装处电压的频率有所差别。系统侧电流及风场侧电压的主要频率分量均为工频, 而风电场侧电流主要频率为 $1.2 \times 50 = 60$ Hz。且风场侧故障电压、电流包含有大量的高次谐波, 故障后第一个周波内电压的总谐波畸变率为 2.58, 电流的总谐波畸变率为 7.8839。撬

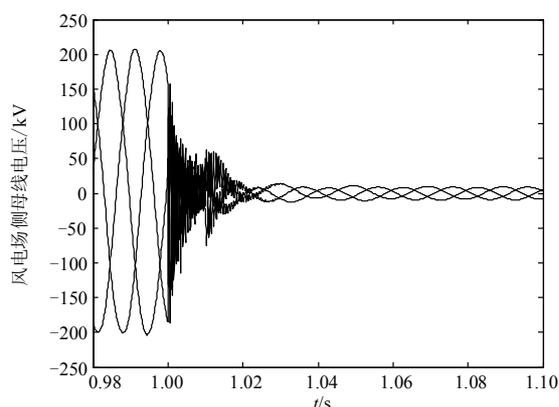


图 2 风电场侧母线电压

Fig. 2 Wind farm voltage of the busbar

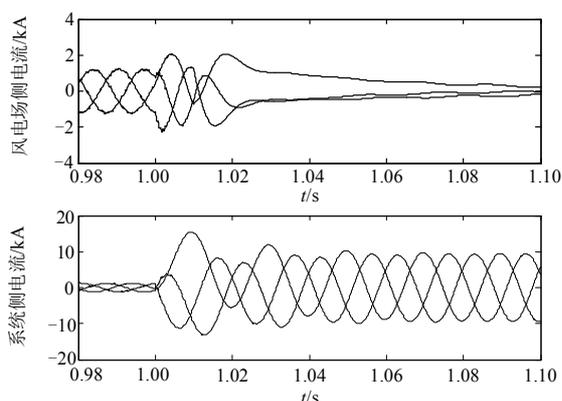


图 3 风电场侧电流与系统侧电流

Fig. 3 Wind farm current and system current

棒保护动作前后风电场运行状态的变化会导致基于工频相量的距离保护算法出现跨数据窗问题从而不能正常工作。而解微分方程算法是基于线路 RL 时域模型而设计的算法,并不涉及信号的频域信息,它利用保护安装处的电流、电压瞬时值建立输电线路微分方程组,一般采用最小二乘法求解得到故障距离。解微分方程算法不受直流分量和由衰减非周期分量引起的低频分量造成的影响,也不受电网频率波动的影响^[18-19]。因此,从原理上,使用解微分方程算法可以克服风电场送出线电压、电流主频不同造成的影响。但解微分方程算法受高频分量的影响较大,为此可以考虑将保护安装处测量电压、电流先经过低通滤波,然后再进行计算。但因未对故障点电压进行相同的低通滤波,这将致使采用解微分方程算法求解时,故障初期的电压电流数据不符合实际线路的参数模型,因此计算结果会存在一个暂态过程。为了解决上述问题,提出采用等传变距离保护算法。

2 输电线路等传变距离保护算法

基于输电线路等传变理论快速距离保护算法应用于风电场送出线,主要包括三个步骤:故障点电压重构、低通滤波处理、以及求解 R-L 模型微分方程。

1) 故障点电压重构

故障点电压的重构分为两个时间段,即发生故障前和发生故障后。发生故障前的故障点电压一般为正弦稳态电压,由于不可能预先知道故障点的位置,因此用被保护线路某一点的补偿电压代替,而故障后的故障点电压为过渡电阻上的电压降落,可用流过渡电阻的电流与过渡电阻的乘积来表示。

2) 低通滤波处理

一般微机保护装置的硬件低通滤波器的截止频率都较高,通常只能滤除频率较高的信号,使之符合采样定理的要求,可不考虑其传变特性的影响。而为了进一步降低高频暂态分量对距离保护算法性能的影响,需对电压电流进行截止频率较低的低通滤波。输电线路等传变理论指出,输电线路中的电压和电流经过相同的传变过程后仍然符合输电线路的分布参数特性。先对测量电压、测量电流,以及重构后的故障点电压进行相同的低通滤波处理,然后再进行计算。

3) 求解 R-L 模型微分方程

忽略分布电容,以输电线路发生 A 相单相接地故障为例,经过电压重构之后的解微分方程如式(1)所示。

$$u_{ma}(t) - u_{fa}(t) = l(r_s i_{ma}(t) + r_m i_{mb}(t) + r_m i_{mc}(t) + l_s \frac{di_{ma}(t)}{dt} + l_m \frac{di_{mb}(t)}{dt} + l_m \frac{di_{mc}(t)}{dt}) + i_f(t)R_f \quad (1)$$

式中: $u_{ma}(t)$ 为保护安装处 A 相相电压; $i_{ma}(t)$ 、 $i_{mb}(t)$ 和 $i_{mc}(t)$ 分别为保护安装处 A、B、C 相的相电流; r_s 、 l_s 、 r_m 、 l_m 分别为单位长度输电线路的自电阻、自电感及两相之间的互电阻、互电感; l_0 为短路点距保护安装处的距离; R_f 为短路点的过渡电阻; $i_f(t)$ 为流过渡电阻的电流。重构后的故障点电压由 $u_{fa}(t)$ 和 $i_f(t) \cdot R_f$ 两部分构成。单相接地故障时, $i_f(t)$ 用流过保护安装处的零序电流代替。

用差分代替微分,将一定时间段(如 5 ms)的采样数据代入式(1),得到多个微分方程,从而组成一个微分方程组,用最小二乘法即可求得故障点距保护安装处的距离 l_0 和过渡电阻 R_f 。

电容式电压互感器多用于 330 kV 及以上电压等级输电线路,图 1 中 220 kV 输电线路按常规的电

磁式电压互感器和电磁式电流互感器考虑。在发生故障时，线路电压下降，电磁式电压互感器一般不会出现饱和现象，工程上可认为其传变仍然是线性的；对于电磁式电流互感器，距离保护通常不考虑其饱和情况，即也认为其获得的二次电流与一次电流是线性的关系。因此，这里讨论的风电场送出线等传变距离保护暂不考虑这两个环节的传变影响。

3 仿真分析

为了验证等传变距离保护算法对于风电场送出线距离保护的适用性，采用 PSCAD 对图 1 所示风电场送出线故障进行仿真，采样率为 9.6 kHz。采用解微分方程算法求解时，其最小二乘法的数据窗长取为 5 ms，即 48 个采样点。计算时利用从故障发生后的第一个采样时刻开始的 48 组采样数据计算得到第一个距离值，然后由故障发生后第二个采样时刻开始的同样窗长的 48 组采样数据计算得到第二个距离值，每增加一组采样值，计算得到一个新的距离值，依此类推，计算故障发生后 50 ms 内一系列的保护安装处到故障点的距离值，并以时间为横坐标，测距值为纵坐标，画出时间-测距值曲线图。图中横坐标的原点为故障发生时刻，横轴表示当前数据窗终点所处的时刻。

传统的全周傅氏算法以及解微分方程算法的测距结果如图 4 所示。全周傅氏算法的数据窗为 20 ms，解微分方程算法的数据窗长为 5 ms。由于保护安装处故障电压电流主频率不一致，使得基于工频量的全周傅氏算法无法获得稳定的测距结果，在故障后 36 ms 时测距值偏离真实值的幅度高达 46%，测距曲线波动剧烈。相比之下，解微分方程算法的测距

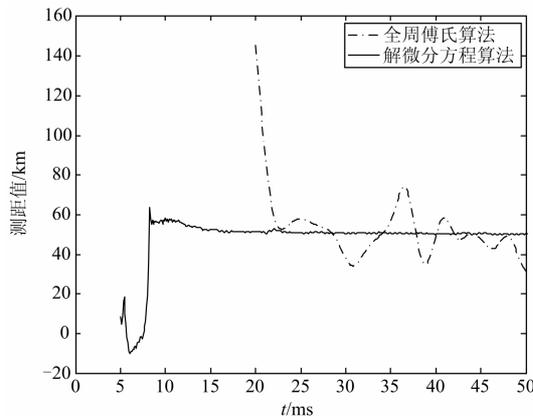


图 4 距保护安装处 50 km 发生金属性两相接地故障时的时间-测距值曲线

Fig. 4 Time-distance curve when a two-phase grounded fault occurs at 50 km away from the relay location

结果在较短时间内即达到稳定，在故障后 15 ms 时测距值偏离真实值的幅度只有 4.28%。

故障电压电流的高频暂态分量会增大解微分方程算法中差分代替微分的误差，从而影响测距结果的准确性。因此，为降低高频分量对算法性能的影响，先采用截止频率为 150 Hz 的二阶巴特沃斯低通滤波器对测量电压和电流进行处理，然后再进行计算，并与不经过低通滤波的解微分方程算法测距结果进行对比，如图 5(a)所示。可见，在故障后 10 ms 时，采用低通滤波后，测距值偏离真实值的幅度只有 6.98%，而未采用低通滤波的情况下，测距值偏离真实值的幅度高达 108.6%；在故障后 30 ms 时，采用低通滤波后，测距值偏离真实值的幅度只有 0.88%，而未采用低通滤波的情况下，测距值偏离真实值的幅度为 6.13%。大量的仿真结果表明，增加低通滤波环节后，削减了故障电压、电流中高频分量对保护算法的影响，使得算法的测距曲线更加的平稳。

尽管采用低通滤波后测距结果有了一定程度的改善，但由于未考虑故障点电压的影响，致使测距曲线在故障初期仍存在较大的暂态过程，因此，在进行低通滤波之前，增加故障点电压重构的环节，即采用等传变距离保护算法，将保护安装处的测量电压、电流以及重构之后的故障点电压进行相同的低通滤波，并与图 5(a)中只经过低通滤波的测距曲线进行对比，如图 5(b)所示。在故障后 5 ms 时，未经过电压重构的测距值偏离真实值的幅度高达 186.5%，而增加了电压重构环节后，测距值偏离真实值的幅度只有 18.0%；在故障后 10 ms 时，未经过电压重构的测距值偏离真实值的幅度为 6.6%，而增加了电压重构环节后，测距值偏离真实值的幅度只有 0.2%。大量的仿真结果表明，经过故障点电压重构后，保护算法的测距曲线的暂态特性得到了显著的改善，能更快速地获得平稳的测距结果。

图 5 中显示等传变距离保护算法在故障初期的测距结果较实际值偏小，为避免初期测距结果的负误差造成保护超越，在构成距离保护判据时，可采用一短数据窗判断测距值是否达到稳定，如果测距结果已达稳定，再开放保护。这对保护的動作速度并无太大影响，却可以有效避免保护误动。

相较于传统的解微分方程算法，等传变距离保护算法增加了故障点电压重构及低通滤波两个环节，保护性能得到了显著提高。以时间-测距值曲线图来衡量等传变距离保护算法的测距性能时，采用测距值收敛到真实值的 95%到 105%范围内时的时刻 $t_{0.95-1.05}$ 作为时间指标，部分计算结果如表 1 所示。

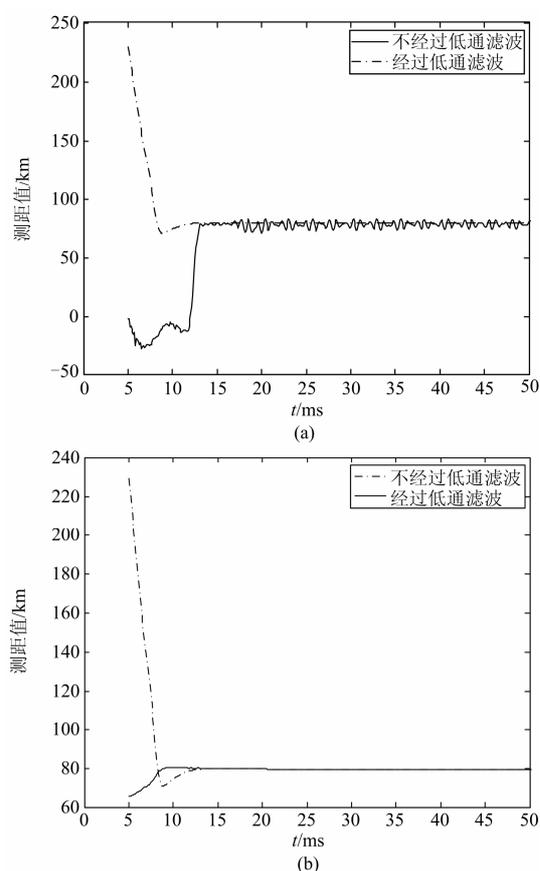


图 5 距保护安装处 80 km 发生金属性三相故障时的时间-测距值曲线

Fig. 5 Time-distance curve when a three-phase fault occurs at 80 km away from the relay location

表 1 等传变距离保护测距结果

Table 1 Distance measuring results of differential equation algorithm

| 故障位置 | $t_{0.95-1.05}/ms$ | | | |
|-----------|--------------------|--------|--------|------|
| | 单相接地故障 | 两相相间故障 | 两相接地故障 | 三相故障 |
| $l=10$ km | 5.00 | 6.88 | 6.98 | 6.98 |
| $l=30$ km | 5.73 | 6.77 | 7.08 | 6.88 |
| $l=50$ km | 5.42 | 7.81 | 7.92 | 7.81 |
| $l=80$ km | 5.10 | 7.92 | 8.13 | 8.02 |

大量仿真计算结果表明, 在风电场送出线上不同位置处发生不同类型故障时, 等传变距离保护算法均能克服风电暂态电压、电流的影响, 并快速正确测得故障距离。

4 结论

双馈式风电场在送出线路故障期间的电磁暂态特性与传统电网存在显著差异。风电送出线路风场

侧保护安装处电压与电流主要频率分量不一致是致使传统的基于基频相量的距离保护算法受到严重影响的主要因素。而解微分方程算法是基于线路的时域微分方程模型, 不涉及信号的频域信息, 但受故障高频暂态分量影响较大。等传变距离保护算法在传统解微分方程算法的基础上增加了故障点电压重构和低通滤波处理, PSCAD/EMTDC 仿真结果表明, 在风电暂态电压、电流作用下, 基于等传变距离保护算法的距离保护元件可以保证测距结果的准确性, 且对各种故障类型都具有较高的灵敏度, 性能显著优于傅氏算法及传统的解微分方程算法, 因此适用于风电场送出线路的距离保护。

参考文献

[1] 朱星阳, 张建华, 刘文霞, 等. 风电并网引起电网电压波动的评价方法及应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 88-98.
ZHU Xingyang, ZHANG Jianhua, LIU Wenxia, et al. Evaluation methodology and its application of voltage fluctuation in power network caused by interconnected wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 88-98.

[2] 伍玮. 风电并网对系统继电保护的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
WU Wei. Study on the effects of wind power integration impact on the relay protection[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.

[3] 2013 年中国风电装机容量统计报告[C] // 中国农机工业协会风能设备分会《风能产业》, 2014(3): 5.
Installed wind power capacity of china in 2013[C] // Chinese Wind Energy Equipment Association 《Wind Energy Industry》, 2014(3): 5.

[4] 张纯江, 王勇, 柴秀慧, 等. 基于二自由度的双馈风力发电系统并网控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 203-208.
ZHANG Chunjiang, WANG Yong, CHAI Xiuhui, et al. Grid-connected control strategy of double-fed wind power system based on two-degree-of-freedom[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 203-208.

[5] 毕天姝, 刘素梅, 薛安成, 等. 具有低电压穿越能力的双馈风电机故障暂态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 26-31.
BI Tianshu, LIU Sumei, XUE Ancheng, et al. Fault analysis of doubly fed induction generator wind turbines with low-voltage ride-through capability[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 26-31.

[6] 严干贵, 王茂春, 穆钢, 等. 双馈异步风力发电机组联网运行建模及其无功静态调节能力研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(7): 98-104.
YAN Gangui, WANG Maochun, MU Gang, et al.

- Modeling of grid-connected doubly-fed induction generator for reactive power static regulation capacity study[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(7): 98-104.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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, 41(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, 41(4): 1-5, 11.
- [10] 张保会, 张金华, 原博, 等. 风电接入对继电保护的影响(六)——风电场送出线路距离保护影响分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 41(6): 1-6.
ZHANG Baohui, ZHANG Jinhua, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection(6): analysis of distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 41(6): 1-6.
- [11] 文明浩, 陈德树, 尹项根, 等. 超高压线路等传变快速距离保护[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 145-150.
WEN Minghao, CHEN Deshu, YIN Xianggen, et al. Fast distance protection of EHV transmission lines after equal transfer processes[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 145-150.
- [12] 撒奥洋, 张哲, 尹项根, 等. 双馈风力发电系统故障特性及保护方案构建[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 233-239.
HAN Aoyang, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Research on fault characteristic and grid connecting-point protection scheme for wind power generation with doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 233-239.
- [13] 郭家虎, 张鲁华, 蔡旭. 双馈风力发电系统在电网三相短路故障下的响应与保护[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 40-48.
GUO Jiahu, ZHANG Luhua, CAI Xu. Response and protection of DFIG system under three-phase short circuit fault of grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 40-48.
- [14] 蒋雪冬, 赵舫. 应对电网电压骤降的双馈感应风力发电机 Crowbar 控制策略[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 84-89.
JIANG Xuedong, ZHAO Fang. Crowbar control strategy for doubly fed induction generator of wind farm during power grid voltage dips[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 84-89.
- [15] 吕志强, 许国东. 兆瓦级双馈风电机组电网故障时的暂态分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 112-116.
LÜ Zhiqiang, XU Guodong. Transient analysis of grid short circuit fault of megawatt doubly fed wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 112-116.
- [16] 孟岩峰, 胡书举, 王玲玲, 等. 电网故障条件下双馈机组运行特性分析及其协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 106-113.
MENG Yanfeng, HU Shuju, WANG Lingling, et al. Characteristics analysis and coordinated control of the doubly-fed wind power system under grid transient fault[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 106-113.
- [17] PANNELL G, ATKINSON D J, ZAHAWI B. Minimum-threshold Crowbar for a fault-ride-through grid-code-compliant DFIG wind turbine[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3): 750-759.
- [18] 张艳霞, LI K K. 基于微分方程的自适应窗长距离保护算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 25-28, 34.
ZHANG Yanxia, LI K K. Study of adaptive window length algorithm based on linear differential equation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 25-28, 34.
- [19] 陈朝晖, 黄少锋, 陶惠良. 基于 Bergeron 模型的长线路微分方程算法研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(9): 31-34, 81.
CHEN Zhaohui, HUANG Shaofeng, TAO Huiliang. Research on the application of the Bergeron model to the differential equation algorithm for long transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(9): 31-34, 81.

收稿日期: 2014-09-22; 修回日期: 2014-11-26

作者简介:

袁愉涛(1967-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事继电保护专业管理、智能变电站研究工作; E-mail: zdqyt@vip.sina.com

何荷(1992-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制。E-mail: 892898088@qq.com

(编辑 张爱琴)