

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201284

基于波形相关分析的双馈风电场送出线时域距离保护

张太升^{1,2}, 韩伟³, 杨霖⁴, 田宝江¹, 陈玉⁴, 段文岩³, 姚孟¹, 文明浩⁴

(1. 国网河南省电力公司电力调度控制中心, 河南 郑州 450052; 2. 国网河南省电力公司焦作供电公司, 河南 焦作 454003; 3. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 4. 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: 双馈风机故障暂态特性与传统同步发电机不同, 其短路电流成分复杂, 导致基于工频相量的距离元件动作性能劣化。为了解决工频相量距离保护在双馈风电场送出线中应用时存在的问题, 提出了一种基于波形相关分析的时域距离保护方案。分析了波形相似度的原理及时间窗选取的依据, 通过仿真验证了所选时间窗的合理性。基于此分析, 构造了时域距离保护判据, 并在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建模型进行了测试。仿真结果表明, 在不同故障类型下, 所提出的时域距离保护基本不受双馈风机故障特性的影响, 具有较好的动作性能。

关键词: 双馈风机; 波形相似度; 工频相量距离保护; 时域距离保护; Prony 算法

Time-domain distance protection for transmission lines of doubly-fed wind farms based on waveform correlation analysis

ZHANG Taisheng^{1,2}, HAN Wei³, YANG Lin⁴, TIAN Baojiang¹, CHEN Yu⁴, DUAN Wenyan³, YAO Meng¹, WEN Minghao⁴

(1. State Grid Henan Electric Power Dispatching Control Center, Zhengzhou 450052, China; 2. Jiaozuo Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Jiaozuo 454003, China; 3. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 4. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The fault transient characteristics of a Doubly Fed Induction Generator (DFIG) are different from traditional synchronous generators. The short-circuit current components of the former are complex. They may lead to the deterioration of the operating performance of the distance protection based on the power frequency phasor. To solve the problems of power frequency phasor based distance protection being applied in the transmission lines of double-fed wind farms, a time-domain distance protection based on waveform correlation analysis is proposed. The principle of waveform similarity and the standard of time window selection are analyzed. The rationality of the selected time window is verified by simulation. Then, the time-domain distance protection criterion is constructed. A simulation model is built and tested using the PSCAD/EMTDC platform. The simulation results show that the proposed time-domain distance protection is basically unaffected by DFIG fault characteristics and has good performance under different types of faults.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877090).

Key words: doubly fed induction generator; waveform similarity; power frequency phasor based distance protection; time-domain distance protection; Prony method

0 引言

目前, 我国电网已经成为全世界新能源发展最快、装机规模最大的电力系统, 新能源装机规模居世界第一位。其中, 双馈风电机组作为主流的技术方案之一, 得到了广泛使用。虽然我国风力资源丰

富, 但其分布大多远离负荷中心, 大规模的风电场通常需要通过送出线接入交流电网^[1-2]。因此, 风电场送出线保护的性能对风电场安全稳定运行具有重要的意义。

距离保护具有不受系统运行方式影响、整定依据明确等优点, 在交流输电线路中得到广泛应用。针对传统距离保护方案在双馈风机送出线上的适应性问题, 诸多专家学者已经进行了深入的研究。双

馈风机的故障特性与传统交流电源故障特性不同, 受双馈风机控制系统快速调节作用、撬棒保护、卸荷电路等因素的影响, 双馈风机故障后的短路电流成分较为复杂。尤其是当撬棒保护电路动作后会产生衰减的转速频率分量, 一般在 35~65 Hz^[3-7]。这些频率的电流成分难以被低通滤波器滤除, 因此对傅氏算法提取的工频相量有较大的影响, 基于工频相量的距离保护在双馈风电场送出线中应用时性能会劣化。

文献[8-9]对双馈风机送出线路的故障特性进行了分析, 说明了双馈风机故障时的非工频电流成分对于傅里叶算法的严重影响, 指出了传统距离保护在双馈风电应用中存在的问题。文献[10-12]指出了双馈风机短路电流的特性在各种故障类型下对于距离保护元件的影响, 并对其原因进行了详细的分析说明, 但并未提出针对性的解决方案。文献[13-15]将解微分方程算法应用于风电场送出线距离保护, 并对该保护方案的动作性能进行了验证, 但对于采样频率的要求较高。文献[16]提出了一种基于电压相角比较的单相接地距离保护原理, 验证了各种运行方式、过渡电阻下保护动作的正确性, 但该原理仅针对单相接地故障, 没有对相间故障进行研究。文献[17]研究了双馈风机的阻抗特性, 提出了一种针对接地故障的自适应距离保护方案, 并给出了整定依据。

综上所述, 由于双馈风电故障电流中谐波成分复杂, 传统距离保护在双馈风电送出线上应用时存在问题。本文对传统比相式距离元件的适应性进行了分析, 提出了一种基于波形相似度比较的时域距离元件, 根据保护安装处的工作电压波形及由此推算得到的整定点工作电压波形的余弦波形相似度, 判断是否发生区内故障。仿真分析表明, 提出的时域距离元件在双馈风电场送出线中应用时具有较好的性能, 对采样频率要求低, 动作速度较快。

1 传统比相式距离元件在双馈风机并网送出线的适应性分析

传统比相式距离元件的相位比较判据为

$$90^\circ \leq \text{Arg}\left(\frac{\dot{U}_m}{\dot{U}_s}\right) \leq 270^\circ \quad (1)$$

式中: \dot{U}_m 为保护安装处的电压相量; $\dot{U}_s = \dot{U}_m - \dot{I}_m Z_{\text{set}}$ 为推算的整定点电压相量, \dot{I}_m 为保护安装处的电流相量, Z_{set} 为整定阻抗。

传统的比相式距离元件中, 一般采用傅氏算法提取电压和电流相量。若在某些故障状况下, 撬

棒保护动作, 双馈风机的故障电流将产生衰减的转速频率分量, 这些分量接近基频, 难以被低通滤波器完全滤除, 将影响傅氏算法的精度, 因此, 传统比相式距离元件的判断结果也势必会受到影响, 导致其灵敏度降低, 甚至发生误动。

为分析传统比相式距离元件在双馈风机并网送出线上的适应性, 验证前述结论, 在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建了图 1 所示的双馈风机集中式接入仿真系统。系统中, 送出线的长度为 100 km, 每千米参数如表 1 所示, 采样率设置为 2.4 kHz。

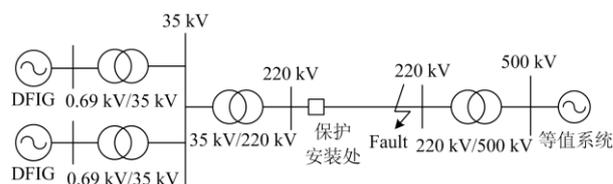


图 1 双馈风电场仿真系统

Fig.1 Simulation system of doubly-fed wind farm

表 1 送出线单位公里参数

Table 1 Outgoing line parameters per kilometer

r_1 / Ω	l_1 / mH	$c_1 / \mu\text{F}$	r_1 / Ω	l_0 / mH	$c_0 / \mu\text{F}$
0.053	1.081	0.0132	0.291	2.74	0.008

如图 1 所示, 设置故障距离为 60 km, 故障时刻为 0.6 s, 故障类型为 A 相接地故障。使用 Prony 算法^[18-19]提取相量计算的相角差和使用傅氏算法提取相量计算的相角差如图 2 所示, 其中灰色区域为动作区。可以看出, 由于 Prony 算法提取工频相量时, 不会受到其他频率分量的影响, 因此得到的计算结果准确, 而傅氏算法得到的计算结果受双馈风机的故障电流特性影响较大, 在故障后出现较大波动, 甚至离开了动作区。可以得出结论, 由于双馈风机故障后电流谐波成分复杂, 当撬棒保护动作时, 衰减的转速频率分量会对傅氏算法提取相量的传统

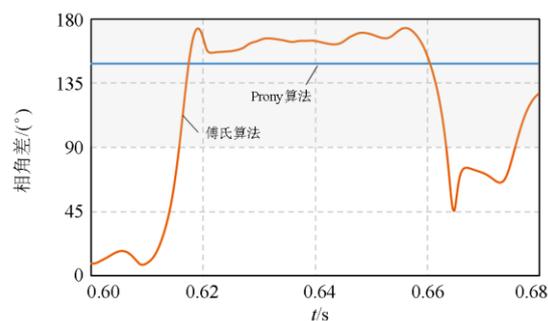


图 2 使用 Prony 算法和傅氏算法的传统比相式距离元件计算结果

Fig.2 Calculation result of the traditional comparison distance relay using Prony algorithm and Fourier algorithm

比相式距离元件造成较大影响，导致保护元件灵敏度降低，甚至出现拒动。因此，使用傅氏算法的传统比相式距离元件应用在双馈风机并网送出线上时存在适应性问题。

2 基于波形相似度分析的距元元件

如前文所述，传统的比相式距离元件在双馈风电并网送出线上存在的问题主要是傅氏算法提取相量受到双馈风机故障电流特性的影响。因此，引入波形相似度算法^[20-23]，构造判据实现相位比较。

2.1 波形相似度算法的基本原理

波形相似度是一种描述波形之间相关性的指标，其计算方法如式(2)所示。

$$\mu(x, y) = \frac{\int_t^{t+T} x(\tau)y(\tau)d\tau}{\sqrt{\int_t^{t+T} [x(\tau)]^2 d\tau} \sqrt{\int_t^{t+T} [y(\tau)]^2 d\tau}} \quad (2)$$

式中： $\mu(x, y)$ 为波形余弦相似度； $x(\tau)$ 、 $y(\tau)$ 分别对应两个时域波形； t 为时间窗起始时刻； T 为时间窗长度。

根据式(2)可以得出，当 $x(\tau) = \sin \omega\tau$ 、 $y(\tau) = \sin(\omega\tau + \varphi)$ 且时间窗 T 为两波形周期的整数倍时， $\mu = \cos \varphi$ 。若 $\varphi = 0^\circ$ ，即两正弦波形同相，则 $\mu = 1$ ；若 $\varphi = 180^\circ$ ，即两正弦波形反相，则 $\mu = -1$ ；若 φ 介于 0° 与 180° 间，则 μ 随两波形间的相位差增大而减小。因此，可以通过计算保护安装处电压和整定点处电压的波形相似度，得到它们之间的相位差信息，进而判断故障位置是否在动作区内。

2.2 波形相似度算法的时间窗选择

在应用于实际保护中时，算法的时间窗长度对于算法的动作精度和速度有较大的影响。基于波形相似度算法的原理，可以使用标准的正弦函数评估时间窗长度对保护性能的影响。将 $x(\tau) = \sin \omega\tau$ 、 $y(\tau) = \sin(\omega\tau + \varphi)$ 代入式(2)，化简得

$$\begin{aligned} \mu(x, y) &= \frac{\int_t^{t+T} x(\tau)y(\tau)d\tau}{\sqrt{\int_t^{t+T} [x(\tau)]^2 d\tau} \sqrt{\int_t^{t+T} [y(\tau)]^2 d\tau}} = \\ &= \frac{\int_t^{t+T} \sin(\omega\tau)\sin(\omega\tau + \varphi)d\tau}{\sqrt{\int_t^{t+T} \sin^2(\omega\tau)d\tau} \sqrt{\int_t^{t+T} \sin^2(\omega\tau + \varphi)d\tau}} = \\ &= \frac{\frac{1}{2}T \cos \varphi - \frac{\sin(\omega T)}{2\omega} \cos(2\omega t + \omega T + \varphi)}{\sqrt{\frac{1}{2}T - \frac{\sin(\omega T)}{2\omega} \cos(2\omega t + \omega T)} \sqrt{\frac{1}{2}T - \frac{\sin(\omega T)}{2\omega} \cos[2(\omega t + \varphi) + \omega T]}} \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可以看出，当 $\sin(\omega T) = 0$ 时， $\mu = \cos \varphi$ ，能够较好地反映正弦波形之间的相位差。当 $\sin(\omega T) \neq 0$ 时，原式中将出现二倍频分量波动，影

响对波形相似度的判断。

在 Matlab 中分别对 5 ms、7.5 ms、10 ms 和 20 ms 时间窗下不同相角差计算的结果进行了测试，结果如图 3 所示。可以看出，10 ms 和 20 ms 的时间窗能够很好地反映两正弦波形的相角差，计算结果稳定，而对于 5 ms 和 7.5 ms 的时间窗，计算结果波动幅度很大。

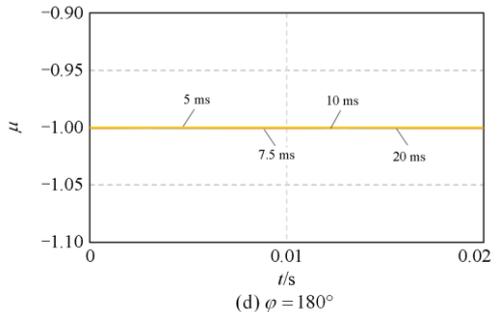
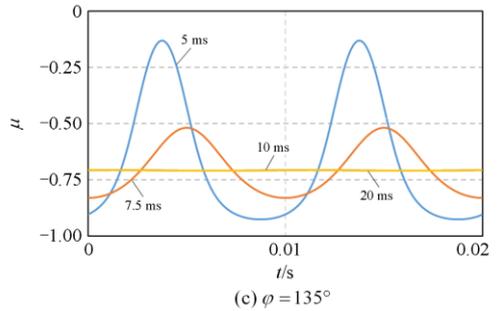
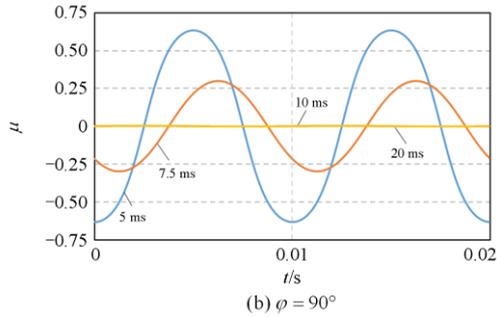
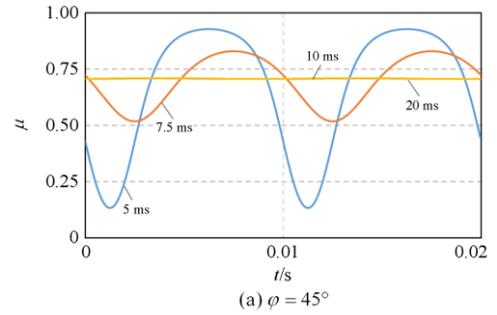


图 3 不同相角差下各时间窗长度的波形相似度计算结果
Fig. 3 Waveform similarity calculation results of each time window length under different phase differences

由于双馈风机故障电流中衰减的转速频率分量在 35~65 Hz 之间, 为验证 10 ms 时间窗长时频率对波形相似度计算的影响, 分别针对频率为 35 Hz、50 Hz 和 65 Hz 时, 不同相角差下的波形相似度计算结果进行了测试, 结果如图 4 所示。可以看出, 对于不同的频率, 时间窗取 10 ms 时, 波形相似度的计算结果差别在 ± 0.3 以内, 通过合适的门槛值选取, 可以兼顾保护的可靠性和速动性要求。因此选择 10 ms 作为最终的时间窗长度。

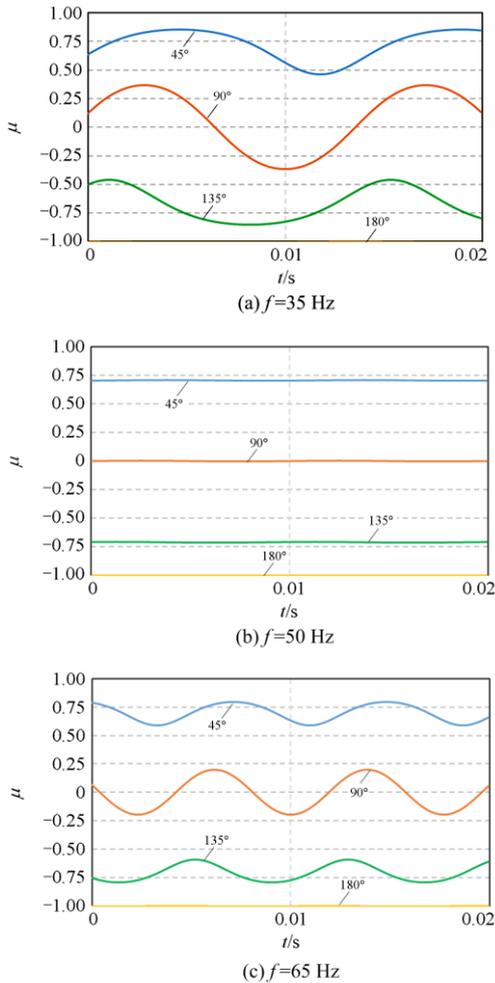


图 4 时间窗为 10 ms 时不同频率下的波形相似度计算结果
Fig. 4 Waveform similarity calculation results at different frequencies when the time window is 10 ms

2.3 判据实现

将式(2)离散化处理, 得到

$$\mu(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N x(i)y(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x^2(i)}\sqrt{\sum_{i=1}^N y^2(i)}} \quad (4)$$

式中, N 为时间窗长度。

在时域中, 各相及各相间的整定点电压由保护安装处的电压、电流通过式(5)、式(6)推算得到。

$$u_{s\varphi} = u_{m\varphi} - R_{\text{set}} i_{k\varphi} - L_{\text{set}} \frac{di_{k\varphi}}{dt} \quad (5)$$

$$u_{s\varphi\varphi} = u_{m\varphi\varphi} - R_{\text{set}} i_{m\varphi\varphi} - L_{\text{set}} \frac{di_{m\varphi\varphi}}{dt} \quad (6)$$

式中: $u_{s\varphi}$ 、 $u_{s\varphi\varphi}$ 分别为推算的整定点相、相间电压; $u_{m\varphi}$ 、 $u_{m\varphi\varphi}$ 分别为保护安装处的相、相间电压; $i_{k\varphi} = i_{m\varphi} + 3ki_0$ 为经零序补偿的相电流, 其中 $i_{m\varphi}$ 为保护安装处的相电流, k 为零序补偿系数, i_0 为零序电流; $i_{m\varphi\varphi}$ 为保护安装处的相电流差; R_{set} 、 L_{set} 为整定电阻及整定电感。

根据前述分析, 基于波形相似度的距离元件动作判据为

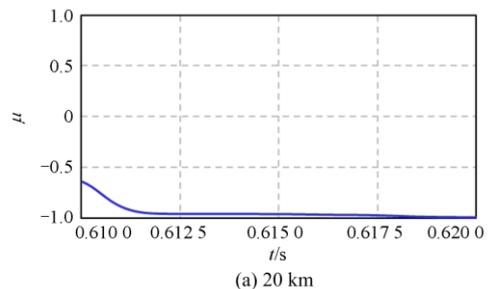
$$\mu(u_m, u_s) \leq \mu_{\text{set}} \quad (7)$$

式中: u_m 为保护安装处电压的时域波形; u_s 为整定点电压的时域波形; μ_{set} 为门槛值。当满足式(7)时, 则判断为区内故障; 当不满足式(7)时, 则判断为区外故障。考虑发生区外故障时, 保护安装处与整定点电压之间的相位差一般不会超过 60° , 因此可根据前述分析, 将门槛值 μ_{set} 设定为 0.5。

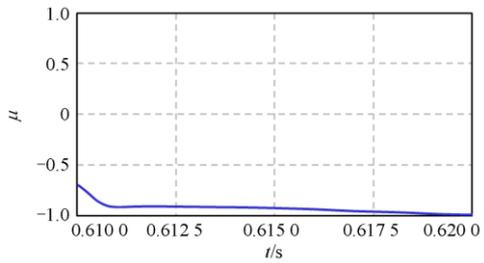
3 仿真分析

为验证本文提出的基于波形相似度的距离元件动作的正确性, 在 PSCAD/EMTDC 上搭建如图 1 所示的仿真系统, 分别在距保护安装处 20 km、40 km、60 km、80 km 及 100 km 处设置故障, 整定距离为 80 km, 时间窗长度选择为 10 ms, 采样率设为 2.4 kHz, 故障时间为 0.6 s, 保护元件从 0.61 s 开始判断。

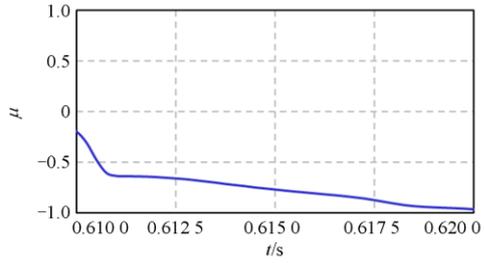
图 5 为发生 A 相金属性接地故障时故障相(A 相)距离元件的动作情况。可以看出, 在送出线上发生区内故障时, 故障相元件能够在故障后 11 ms 内动作; 在送出线上发生区外故障时, 故障相元件不动作。



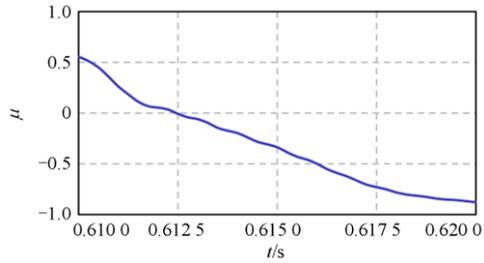
(a) 20 km



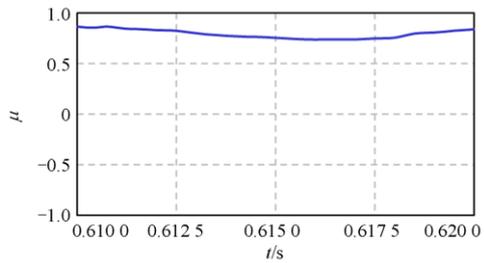
(b) 40 km



(c) 60 km



(d) 80 km

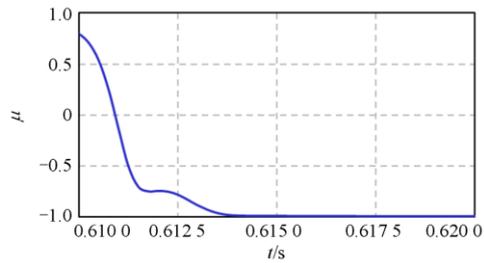


(e) 100 km

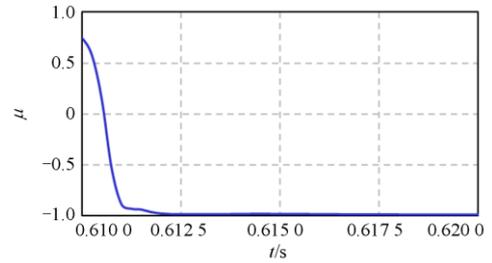
图 5 A 相金属性接地故障时故障相元件的动作情况

Fig. 5 Actions of faulty phase components during phase A metallic ground fault

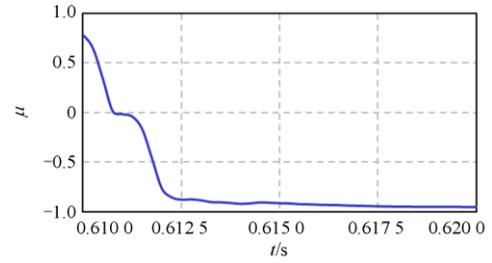
图 6 为发生 BC 相间金属性短路故障时故障相间(BC)距离元件的动作情况。可以看出, 在送出线



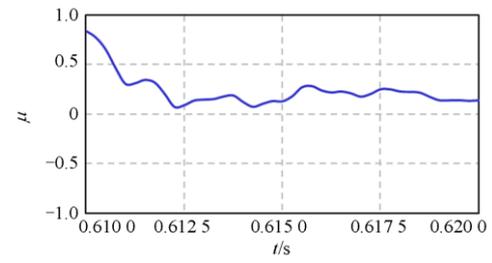
(a) 20 km



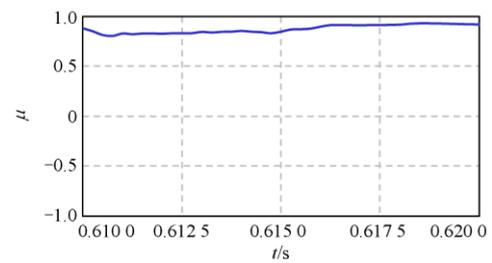
(b) 40 km



(c) 60 km



(d) 80 km



(e) 100 km

图 6 BC 相间金属性短路故障时故障相间元件的动作情况

Fig. 6 Actions of faulty phase-to-phase components during phase B and phase C metallic short-circuit fault

上发生区内故障时, 故障相间元件能够在故障后 11 ms 内动作; 在送出线上发生区外故障时, 故障相间元件不动作。

发生两相金属性接地故障、三相金属性短路故障时, 故障相(相间)元件动作情况如表 2 所示。大量仿真结果表明, 本文所提出的基于波形相似度的距离元件在金属性故障下具有较好的动作性能。

表 2 中同时给出了本文所提出的方案与传统比相式距离元件的动作情况。从仿真结果可以看出, 区内故障时传统比相式距离元件不能持续正确动

作, 存在拒动风险; 区外故障时存在误动风险。本文提出的基于波形相似度的时域距离元件具有较好的动作特性。

表 2 不同故障类型下所提算法的动作情况

Table 2 Operation of the proposed relay under different fault type conditions

故障类型	故障位置/km	本文所提方法的动作情况	传统工频相量距离保护动作情况
BC 两相金属性接地故障	20	10.8 ms 动作	不能持续正确动作
	40	10.4 ms 动作	不能持续正确动作
	60	10.5 ms 动作	不能持续正确动作
	80	11.0 ms 动作	不能持续正确动作
	100	不动作	存在误动风险
三相金属性短路故障	20	10.0 ms 动作	不能持续正确动作
	40	10.0 ms 动作	不能持续正确动作
	60	10.0 ms 动作	不能持续正确动作
	80	10.6 ms 动作	不能持续正确动作
	100	不动作	存在误动风险

4 结论

双馈风电并网送出线上, 由于双馈风机故障电流中存在转速频率分量难以滤除, 基于傅氏算法提取相量的传统比相式距离元件存在问题, 无法正常工作。本文提出的基于波形相似度的距离元件, 利用保护安装处电压和推算整定点电压的时域波形, 分析其波形相似度, 用于判断故障位置, 不受故障电流中转速频率分量的影响。大量的仿真结果表明, 本文所提出的保护原理在不同故障类型下都具有良好的动作性能, 动作速度快, 对于采样率的要求低, 性能优于基于傅氏算法相量提取的传统距离元件, 适用于双馈风机并网送出线上的距离保护。在今后的研究中将进一步分析影响基于波形相似度算法各种因素, 改进保护算法以提升距离保护在大规模新能源接入场景下的性能。

参考文献

- [1] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81.
CHI Yongning, LIU Yanhua, WANG Weisheng, et al. The impact of wind power integration on the power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 77-81.
- [2] 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. Overview of relay protection problems for large-scale wind power integration[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 195-201.
- [3] 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.
- [4] 黄涛, 陆于平, 凌启程, 等. 撬棒电路对风电场侧送出线距离保护的影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 30-36.
HUANG Tao, LU Yuping, LING Qicheng, et al. The influence of crowbar circuit on distance protection of wind farm side transmission line and countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 30-36.
- [5] 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. Research on the characteristics of grid-connected doubly-fed wind turbines when the grid is short-circuited[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 17-25.
- [6] 翟佳俊, 张步涵, 谢光龙, 等. 基于撬棒保护的双馈风电机组三相不对称短路电流特性[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 18-23.
ZHAI Jiajun, ZHANG Buhuan, XIE Guanglong, et al. Three-phase symmetrical short-circuit current characteristics of doubly-fed wind turbines based on crowbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 18-23.
- [7] 李辉, 赵猛, 叶仁杰, 等. 电网故障下双馈风电机组暂态电流评估及分析[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(8): 45-51.
LI Hui, ZHAO Meng, YE Renjie, et al. Evaluation and analysis of transient currents of doubly-fed wind turbines under grid faults[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(8): 45-51.
- [8] 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. The impact of wind power access on relay protection (IV)—analysis of protection performance of wind farm transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 1-5, 11.
- [9] 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. The influence of the frequency characteristics of doubly-fed wind farms on distance protection[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9): 116-120.
- [10] 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, 45(6): 37-47.
LI Jing, ZHENG Tao, ZHAO Yutong, et al. Analysis of the influence of double-fed wind power short-circuit current characteristics on distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 37-47.

- [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 of doubly-fed wind farms on distance protection and protection strategies[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 18-27.
- [12] 陈琳浩, 张金华, 都劲松, 等. 采用电压极化的比相式距离保护用于双馈式风电场送出线路适用性分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 74-79.
CHEN Linhao, ZHANG Jinhua, DU Jinsong, et al. Applicability analysis of phase-comparison distance protection using voltage polarization for doubly-fed wind farm transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 74-79.
- [13] 裘愉涛, 潘武略, 倪传坤, 等. 风电场送出线等传变距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 61-66.
QIU Yutao, PAN Wulüe, NI Chuankun, et al. Equal transmission distance protection for wind farm transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 61-66.
- [14] 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, 33(6): 1-6.
ZHANG Baohui, ZHANG Jinhua, YUAN Bo, et al. The influence of wind power integration on relay protection (VI)—analysis of the influence of distance protection of wind farm transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 1-6.
- [15] 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 lines of doubly-fed wind farms[J]. Transactions of the China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 252-260.
- [16] 李生虎, 唐彩林, 吴东, 等. 基于电压相位比较的双馈风电场输电线路单相接地距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 1-7.
LI Shenghu, TANG Cailin, WU Dong, et al. Single-phase grounding distance protection for doubly-fed wind farm transmission lines based on voltage phase comparison[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 1-7.
- [17] 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 the characteristics of doubly-fed asynchronous wind turbine[J]. Transactions of the China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 124-133.
- [18] ZYGARLICKI J, MROCZKA J. Prony's method used for testing harmonics and interharmonics in electrical power systems[J]. Metrology and Measurement Systems, 2012, 19(4): 659-672.
- [19] 张俊峰, 杨婷, 陈珉, 等. 基于 Prony 滑动平均窗算法的电力系统低频振荡特征分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 178-183.
ZHANG Junfeng, YANG Ting, CHEN Min, et al. Power system low-frequency oscillation characteristics analysis based on Prony sliding average window algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 178-183.
- [20] KHODAPARAST J, KHEDERZADEH M. Least square and Kalman based methods for dynamic phasor estimation: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 1-18. DOI: 10.1186/s41601-016-0032-y.
- [21] 陈玉, 文明浩, 胡列翔, 等. 双馈风机风电场联络线出口故障方向判别[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(2): 1-6.
CHEN Yu, WEN Minghao, HU Liexiang, et al. Distinguishing the fault direction of the tie-line outlet of the doubly-fed wind farm wind farm[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2020, 32(2): 1-6.
- [22] 李生虎, 张浩. 风电系统振荡模式对DFIG-PSS传递函数的灵敏度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 11-17.
LI Shenghu, ZHANG Hao. Sensitivity analysis of the oscillation modes to the transfer function of DFIG-PSS in a wind power system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 11-17.
- [23] 肖勇, 赵云, 涂治东, 等. 基于改进的皮尔逊相关系数的低压配电网拓扑结构校验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 37-43.
XIAO Yong, ZHAO Yun, TU Zhidong, et al. Low-voltage distribution network topology verification method based on improved Pearson correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 37-43.

收稿日期: 2020-10-26; 修回日期: 2021-01-07

作者简介:

张太升(1969—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 270957008@qq.com

韩伟(1975—), 男, 本科, 教授级高工, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: haiwei@ha.sgcc.com.cn

陈玉(1990—), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: ChenYu_Huster@hust.edu.cn

(编辑 张爱琴)