DOI: 10.7667/PSPC162027

适应于风电接入系统的抗高阻接地时域方程距离保护研究

侯俊杰[1,3]，樊艳芳[1]，钟 显[2]，陈至军[3]

(1. 新疆大学电气工程学院，新疆 乌鲁木齐 830047；2. 国网湖南省电力公司常德供电分公司，湖南 常德 415000；
3. 国网新疆电力公司乌鲁木齐供电公司，新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要：双馈风电接入系统带来的高次谐波、频率偏移等故障特性使传统工频量距离保护适应性存在问题。基于时域距离保护原理较适用于风电系统送出线，但在送出线发生单相经高阻接地故障时，易发生距离 I 段区内拒动现象，保护适应性存在问题。提出了一种抗高阻接地时域方程距离保护原理。基于时域距离保护原理，通过对时域方程进行重构，增加过渡电阻待识别量，从原理上解决了时域距离保护未充分考虑过渡电阻所带来的不利影响的问题。仿真结果表明，该原理能较好地适用于风电系统送出线，并且有效地避免了风电系统送出线距离 I 段区内发生单相经高阻接地故障时距离保护拒动的现象。

关键词：风电系统；距离保护；时域方程；高阻接地

Research on high resistance grounding time domain equation based distance protection for wind power accessed power system

HOU Junjie[1,3], FAN Yanfang[1], ZHONG Xian[2], CHEN Zhijun[3]

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Changde Power Supply Branch, State Grid Hunan Electric Power Company, Changde 415000, China; 3. Urumqi Power Supply Company, State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830011, China)

Abstract: The feasibility of protection adopts traditional model identification method based on time-domain signal on DFIG based wind power outgoing lines is low because of the high harmonic and frequency deviation. Although the distance protection based on time-domain performs well when being applied on wind power outgoing lines, miss operations of distance zone I may occur under outgoing line single phase high resistance grounding faults. Aiming at the feasibility problem mentioned above, a principle of high resistance grounding time domain equation based distance protection is proposed. Based on time domain distance protection principle, by reconstructing the time domain equation and adding the identification of transition resistance, the defects caused by somewhat ignoring transient resistance is overcome. Simulation results show that, the proposed high resistance grounding time domain equation based distance protection can adapt to the outgoing line of wind farm accessed power system, and avoid the miss operations of distance zone I under outgoing line single phase high resistance grounding faults effectively.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51467019).

Key words: wind power system; distance protection; time domain equation; high impedance ground

0 引言

近些年，大规模风电接入系统，所带来的送出线故障特征较常规能源线路发生了较大改变，基于常规能源线路的传统保护原理在风电接入系统送出线中适应性存在一定问题[1-8]。距离保护因可靠性被广泛作为 220 kV 及以上电压等级输电线路的后备保护，其中距离保护 I 段因动作速度快，保护范围长等特点作为三段式距离保护的主保护之一[9-10]。但在风电接入系统送出线发生单相经高阻接地故障时，会导致基于传统距离保护原理的距离 I 段保护范围大大缩短，区内可能发生距离 I 段保护拒动的现象，需要与其他后备保护配合切除故障，在很大程度上延长了故障切除的时间，增加了风电机组大规模脱网的风险，可能导致事故范围进一步扩大，

基金项目：国家自然科学基金项目(51467019)；新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目（XJGRI2017017）

给风电系统安全稳定运行带来极大的危害。

目前，针对风电接入系统的距离保护，国内外学者已经做了一定的研究，文献[11-12]从风电场的故障特性及风机自身运行特性的角度出发，分别对工频故障分量及工频量距离保护的适应性进行分析，得出基于工频原理的保护算法存在适应性问题。文献[13]针对双馈风电场的故障特性，对采用电压极化的比相式距离保护的适应性进行研究，得出该原理适应性存在问题的结论。文献[14]提出了风电场送出线等传变距离 I 段保护，该原理利用解微分方程的思想使测距精度提高，但未考虑过渡电阻对保护动作的影响。文献[15-16]提出了基于风电系统送出线时域距离保护，但该原理未考虑距离保护 I 段区内发生单相经高阻接地故障时，保护可能存在区内拒动的现象。以上针对风电接入系统的距离保护研究大多基于传统工频距离保护原理，未充分考虑风电系统故障特性及过渡电阻的影响，并且针对时域原理距离保护的研究较少。

因此，文中针对风电接入系统时的故障特性以及考虑风电接入系统送出线发生经高阻接地故障时的情况，从时域的角度出发，提出了适应于风电接入系统的抗高阻接地时域方程距离保护。文中首先对工频量及时域距离保护原理的特点进行分析，并基于时域距离保护原理对时域方程进行重构，增加过渡电阻待识别量，从原理上解决了时域距离保护未考虑过渡电阻带来的问题。最后结合某地区双馈风电系统算例的故障特性，对工频量、时域距离保护以及抗高阻接地时域方程距离保护原理的适应性进行仿真验证。

1　工频量、时域距离保护在风电接入系统时的适应性分析

基于传统工频量及时域距离保护原理特点，对上述保护在风电接入系统时的适应性进行分析。

1.1　工频量距离保护应用于风电接入系统时的局限性

传统工频量距离保护的基本原理是通过比较保护安装处到故障点的阻抗与整定值的大小，判断区内外故障[17]。应用于常规线路时，可靠性较高。

考虑到风电接入系统时的频率偏移、高谐波特性，使基于传统工频量距离保护因算法需要提取电压、电流的工频量信息而造成的保护不正确动作，可靠性受到影响。另外，工频量距离保护因傅里叶算法，所需数据窗较长，一般利用一个工频周期(20 ms)作为数据窗长度。在不计微机保护的判断时间及保护出口的延时情况下，响应时间与数据窗长度基本保持一致，故保护响应时间约为 0.02 s。

当发生经高阻接地故障时，由于未考虑过渡电阻的影响，导致距离 I 段保护范围大大缩短，区内可能发生拒动的风险，保护性能受到影响。

综上，为克服工频量距离保护在风电接入系统的不利的影响，算法应在时域中实现，并考虑过渡电阻带来的影响。

1.2　时域距离保护原理在风电接入系统时的适应性分析

1.2.1 时域距离保护原理

时域距离保护将故障点到保护安装处的线路用电阻和电感分别表示，即等效为 R-L 线路模型。在发生故障时，满足式(1)[15]。

$$u(t)=R_1 i(t)+L_1\frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中：R_1、L_1 分别为保护安装处距故障点的正序电阻、电感值；$u(t)$、$i(t)$分别为保护安装处电压、电流的时域全量信息。

对时域方程式(1)进行离散化处理，在一定数据窗长度内，组成超定方程组(方程组数大于未知数个数)。运用最小二乘法对该方程组进行求解，得到测量电阻、电感值 R_1'、L_1'。通过与整定值的比较，对故障区域进行判别，实现保护动作。

1.2.2 在风电接入系统时的适应性分析

如式(1)所示，时域距离保护原理面向线路，因提取保护安装处的全量信息，故不受风电系统背侧电源运行方式的限制。从时域的角度出发，不受风电侧频率偏移、高次谐波的影响。另外时域距离保护原理所需数据窗较短，一般小于工频周期(20 ms)，取值为 10~20 ms，较工频量距离保护，响应时间较短，其响应时间约为 0.01~0.02 s。

综上可知，时域距离保护原理克服了工频距离保护原理在风电接入系统送出线中的局限性，较适应于风电接入系统。但同样未考虑风电系统送出线发生经高阻接地故障。

2　适应于风电接入系统的抗高阻接地时域方程距离保护

为解决时域距离保护在风电系统送出线发生单相经高阻接地故障时，易发生距离 I 段区内拒动现象的问题，提出适应于风电接入系统的抗高阻接地时域方程距离保护。

如图 1 所示，风电接入系统送出线为 WS，在 f 点发生单相经高阻 R_g 接地短路故障，W 侧为风电侧保护安装处。

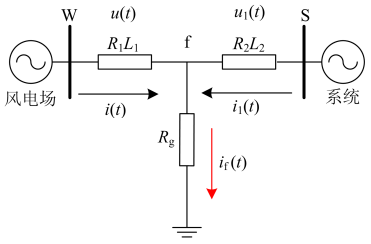


图 1 风电系统经高阻接地短路故障

Fig. 1 Wind power system with high resistance grounding short circuit fault

图 1 中，$u(t)$、$i(t)$、$u_1(t)$、$i_1(t)$分别为两侧保护安装处的电压和电流值；$i_f(t)$为流过过渡电阻的电流。R_1、L_1、R_2、L_2 分别表示线路两侧的电阻和电感值；R_g 为过渡电阻的阻值。

针对经高阻接地故障，可对时域方程式(1)进行重构，增加过渡电阻待识别量，此时保护安装处的电压、电流关系如式(3)所示。

$$u(t)=R_1(i(t)+K_r 3i_0(t))+L_1\frac{\mathrm{d}(i(t)+K_1 3i_0(t))}{\mathrm{d}t}+i_f(t)R_g \tag{3}$$

式(3)中：K_r 和 K_1 分别表示零序电阻、电感的补偿系数，$K_r=(r_0-r_1)/3r_1$，$K_l=(l_0-l_1)/3l_1$；r_0、r_1、l_0、l_1 分别为线路单位长度的正序零序电阻、电感值；$i_0(t)$为场侧线路的零序电流，由零模变换求得；$i_f(t)$为流过过渡电阻的电流；R_g 为过渡电阻的阻值。

式中共有 R_1、L_1、R_g、$i_f(t)$ 4 个未知量，用线性方程组求解较为繁琐，故对上式进行变形可得

$$u(t)=L_1\left[\frac{R_1}{L_1}(i(t)+K_r 3i_0(t))+\frac{\mathrm{d}(i(t)+K_1 3i_0(t))}{\mathrm{d}t}\right]+i_f(t)R_g \tag{4}$$

为简化公式(4)，可用 D 代替，如式(5)所示。

$$D=\frac{R_1}{L_1}(i(t)+K_r 3i_0(t))+\frac{\mathrm{d}(i(t)+K_1 3i_0(t))}{\mathrm{d}t} \tag{5}$$

由式(4)、式(5)可得简化后的方程式，如式(6)所示。

$$u(t)=L_1 D+i_f(t)R_g \tag{6}$$

根据距离保护单端电气量的原理可知，保护安装处无法测得对侧零序电流，为此可将 $i_f(t)$近似等效。假设故障点两侧的零序网络阻抗角近似相等，则流过两端的零序电流同相位，$3i_0(t)$与$i_f(t)$只差一个系数 N，即 $i_f(t)=3Ni_0(t)$，则 $R_g'=NR_g$，故可得

$$u(t)=L_1 D+3i_0(t)R_g' \tag{7}$$

式(7)中，D 中的 R_1/L_1 可由线路参数直接求得为已知量，保护算法在原理上不受其影响。其他变量为保护安装处电压电流的时域全量信息。式中只有 L_1 和 R_g' 两个未知数需要求解。当两侧零序阻抗角不等时，会带来计算误差。

对式(7)进行离散化，利用差分形式替代微分形式，构建抗高阻接地时域方程距离保护。设定保护安装处故障信息采样间隔为 T_s，离散化表达式为

$$u(j)=L_1 D+3R_g' i_0(j) \tag{8}$$

式中：$u(j)$、$i_0(j)$表示第 j 个采样点对应的电压、零序电流瞬时值。

选取特定数据窗长度 M，利用式(8)获得 M/T_s 个不同时刻所对应的采样点瞬时值方程，并组成超定方程组。运用最小二乘法对方程组进行求解，得到测量电感值 L_1'。

通过测量电感值 L_1' 求解故障距离并得到测量电阻值 R_1'，构成所求测量阻抗值 Z_1，通过测量阻抗值 Z_1 与整定值 Z_{set} 的比较，实现距离 I 段保护的动作判据，如式(9)所示。

$$Z_1<Z_{set} \tag{9}$$

当 Z_1<Z_{set}，判定为区内故障，保护动作；反之，判定为区外故障。

综上，抗高阻接地时域方程距离保护，基于时域距离保护原理，在原理上继承了时域距离保护的优越性，较适用于风电接入系统，并且考虑了风电接入系统送出线发生经高阻接地故障的情况，在原理上不受过渡电阻的影响。抗高阻接地时域方程距离保护在原理上较适用于风电接入系统，并且有效地避免了风电系统送出线距离 I 段区内发生单相经高阻接地故障时距离保护拒动的现象。

3　算例仿真验证

3.1 风电接入系统故障仿真分析

本文基于某地区汇集站下的双馈风电系统(网架结构如图 2)构建了集群风电场电磁暂态仿真模型，对风电系统送出线场侧故障特性进行分析。

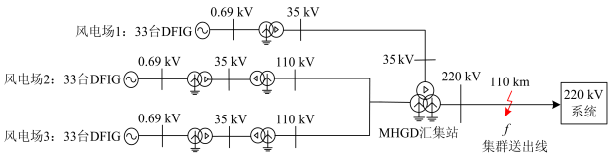


图 2 双馈集群风电汇集接入系统图

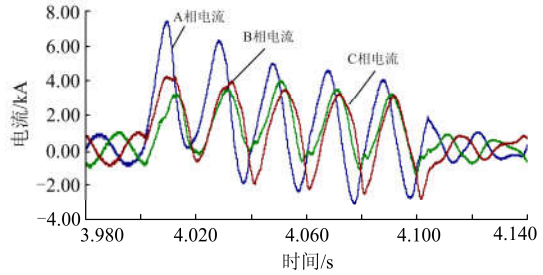
Fig. 2 Cluster of DFIG farms connected to grid

该地区汇集站下的集群风电送出线电压等级为220 kV，双馈机组处于欠同步状态(s=0.8)。双馈集群汇集站主变额定容量500 MW，额定电压38.5/121/230 kV，其短路电压百分比U_{k12}(%)=8，U_{k23}(%)=14，U_{k13}(%)=25；送出线长度为100 km，单位正序线路电阻、电感、电容分别为0.052 Ω/km、

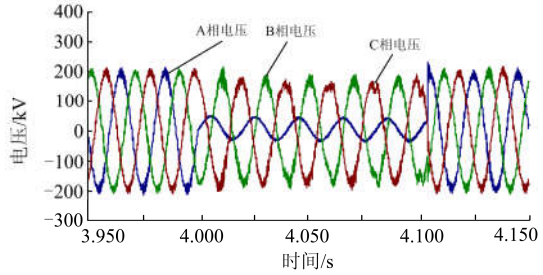
1.080 mH/km、0.013 μF/km；常规电源的正、零序系统阻抗分别为2.41+j54.38 Ω、1.2+j17.6 Ω；单位零序线路电阻、电感、电容分别为0.29 Ω/km、2.7 mH/km、0.009 μF/km。

在 t=4 s 时，双馈集群风电场送出线路中点 f 处发生 A 相接地故障，过渡电阻为 0.1 Ω，风电机组运行转速为 0.8 p.u.，故障持续 0.1 s，故障后 5 ms 机组投入 Crowbar 电路，并利用 FFT 算法对故障相电流进行频谱分析。仿真结果如图 3 所示。

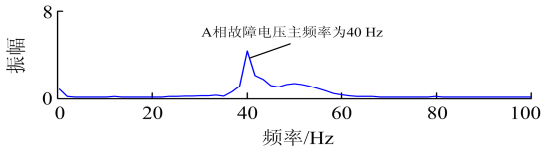
由图 3 可知，当风电系统送出线发生 A 相接地故障时，由于零序分量较大，故三相电流相位基本保持一致，表现为弱馈性(图 3(a))。由快速傅里叶变换可知，由于 Crowbar 电路的作用使其场侧电流频率偏移(图 3(c))。发生各类型故障时，因换流器中含有的大量电力电子器件会产生大量高次谐波(图 3(b))。因风机控制暂态控制策略的变化，导致风电侧系统正负序系统阻抗发生改变(图 3(d))。显然风电系统故障特征明显区别于常规能源。



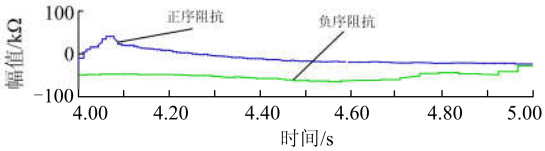
(a) 场侧故障电流



(b) 场侧故障电压



(c) 故障相电流频率分布



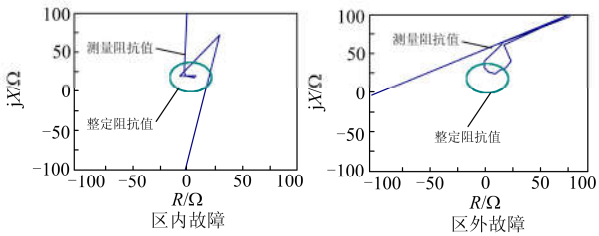
(d) 背侧系统正负阻抗特征

图 3 双馈风电系统故障特征

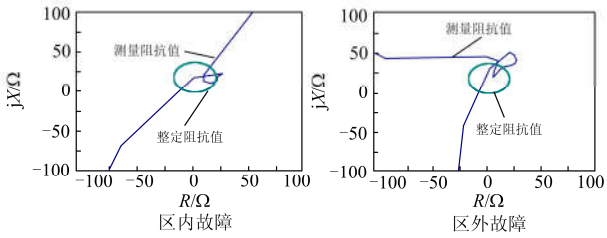
Fig. 3 Fault characteristics of DFIG wind system

3.2 传统工频及时域距离保护仿真验证

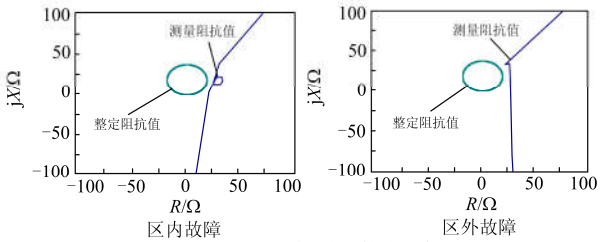
结合 3.1 节风电接入系统的仿真算例，其中距离保护整定值 I 段范围按照线路全长的 85%，仿真验证了在风电系统送出线 45 km 处(I 段距离保护范围内)、90 km 处(I 段距离保护范围外)发生单相接地故障时，两种保护原理的动作情况，过渡电阻分别选择 0 Ω、10 Ω、30 Ω，故障在 0.3 s 发生，故障持续时间为 0.3 s。为保证两种保护算法对比的客观性，并且在满足两种保护算法数据窗提取要求的前提下，统一选择 20 ms 进行仿真验证。由于仿真中不考虑断路器动作时间，即保护响应后装置瞬时动作。验证故障发生后的 0.02 s 时，基于两种保护原理的装置的动作情况。仿真采样频率为 2 kHz，且两种保护都使用截止频率为 400 Hz 的低通滤波器进行滤波，仿真结果如图 4、图 5 所示。



(a) 金属性接地故障



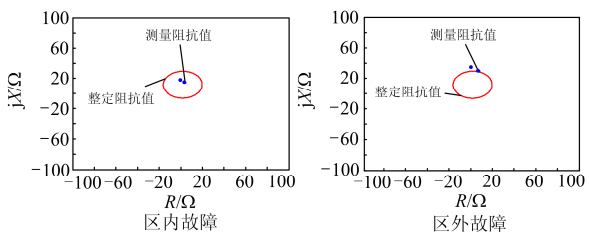
(b) 10 Ω过渡电阻接地故障



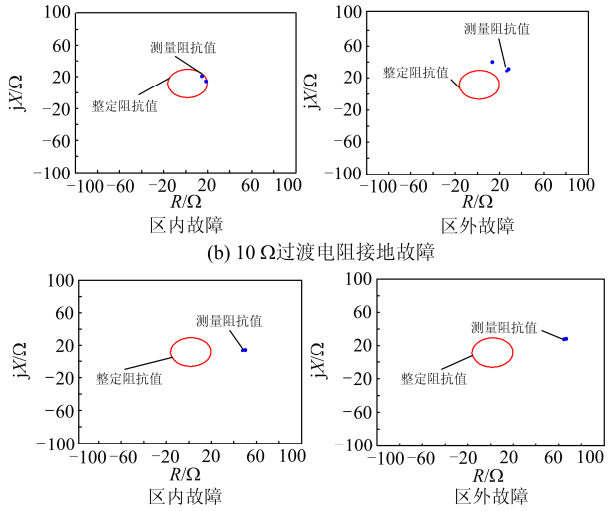
(c) 30 Ω过渡电阻接地故障

图 4 工频量距离保护动作结果

Fig. 4 Action results of power frequency distance protection



(a) 金属性接地故障



(b) 10 Ω过渡电阻接地故障

(c) 30 Ω过渡电阻接地故障

图 5 时域方程距离保护动作结果

Fig. 5 Action results of time domain distance protection

由图 4 可知，基于工频量距离保护在集群风电送出线发生金属性短路故障时，因场侧电压、电流频率不一致以及高次谐波的影响导致在距离 I 段存在区内拒动、区外误动的现象。随着过渡电阻的增加，区内拒动风险增大。

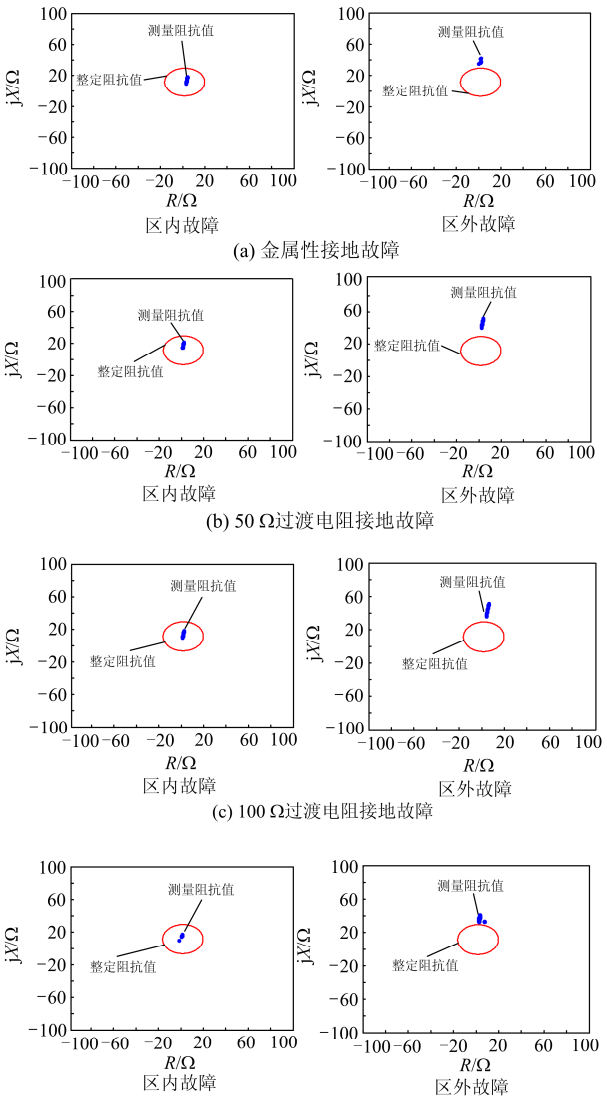
由图 5 可知，基于时域距离保护，在发生金属性接地故障时，距离 I 段区内正确动作、区外不动作，但随着过渡电阻的增加，区内易发生拒动现象，当过渡电阻达到 10 Ω 及以上时，在距离 I 段区内范围内极易发生拒动现象，抗过渡电阻能力较弱。

综上，以上两种保护原理在 20 ms 数据窗下均能判断保护动作情况。基于工频量距离保护原理因风电侧故障特性，保护存在区内拒动，区外误动的现象；而时域距离保护原理不受风电故障特性的影响，在发生金属性短路故障时，保护能够正确动作。但两种保护原理的抗过渡电阻能力均较弱，保护在区内存在拒动现象。

3.3 经高阻接地时域方程距离保护仿真分析

工况参数条件同 3.2 节所述，在满足时域距离保护数据窗长度选择要求的前提下，为验证抗高阻接地时域方程距离保护响应时间的优越性，选取 10 ms 数据窗长度。由于仿真中同样不考虑断路器动作时间，即保护响应后装置瞬时动作。验证故障发生后的 0.01 s 时，保护装置的动作情况。为证明抗过渡电阻性能，以发生单相经 0 Ω、50 Ω、100 Ω、300 Ω 过渡电阻接地故障为例。仿真结果如图 6 所示。

将图 6 中的保护动作结果进行汇总，如表 1 所示。



(a) 金属性接地故障

(b) 50 Ω过渡电阻接地故障

(c) 100 Ω过渡电阻接地故障

(d) 300 Ω过渡电阻接地故障

图 6 经高阻接地时域方程距离保护

Fig. 6 Time domain equation of via the high resistance grounding distance protection

表 1 本文所提距离保护 I 段动作结果

Table 1 Action results of the proposed distance protection

接地类型	区内是否可靠动作	区外是否可靠不动作
金属性接地	是	是
50 Ω 过渡电阻	是	是
100 Ω 过渡电阻	是	是
300 Ω 过渡电阻	是	是

由表 1 可知，经高阻接地时域方程距离保护在风电系统送出线经高阻接地的短路故障中，有较强的抗过渡电阻的性能，能较好地适用于风电系统送出线。继承了时域距离保护的优点，即不受风电系统频率偏移，高谐波及背侧电源的影响；所需数据

窗较短，保护动作响应时间较短，算法精度较高；并且有较强的抗过渡电阻的性能。

4　结论

通过对三种距离保护原理在风电系统的适应性分析可得以下结论：

1) 风电接入电网所带来的高谐波、频率偏移等故障特性使基于传统工频量的距离保护应用于风电系统送出线时存在不正确动作的风险。另外在发生经高阻接地故障时，由于未考虑过渡电阻的影响，极易造成距离 I 段区内保护拒动的现象。

2) 时域距离保护不受风电系统故障特性的影响，在风电系统中的适应性较为理想。并且所需数据窗长度较短，保护响应速度快。但考虑过渡电阻时，适应性存在一定问题：当过渡电阻较小时，动作可靠性较高，但随着过渡电阻的增大，易发生距离 I 段区内保护拒动的现象。

3) 抗高阻接地时域方程距离保护以时域方程为基础，继承了时域距离保护的优越性。通过对时域方程进行重构，增加过渡电阻待识别量，克服了时域距离抗过渡电阻能力弱的缺点，具有较强的抗过渡电阻的能力，较适用于风电接入系统。

4) 以上保护原理均基于时域方程，在风电系统短距离送出线中，适应性较为理想，但忽略了分布电容的影响，当故障发生在长距离输电线路时，其适应性有待进一步研究。

参考文献

[1] 陈伟伟, 李凤婷, 张玉, 等. 风电 T 接双电源系统对距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 108-114.
CHEN Weiwei, LI Fengting, ZHANG Yu, et al. Impact of wind farm on distance protection for T-connected to the dual power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 108-114.

[2] ZHONG Xian, FAN Yanfang, CHEN Weiwei, et al. Study on LVRT coordinate control strategy of DFIG when considering non-rotor side crowbar protection[J]. JCIS, 2015, 11(18): 6747-6757.

[3] 卜强生, 高磊, 宋亮亮, 等. 风电场短路电压电流频率不一致对距离保护及测试的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 21-27.
BU Qiangsheng, GAO Lei, SONG Liangliang, et al. Short circuit current and voltage frequency inconsistency in wind farm and its effect on distance protection and relay protection test[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 21-27.

[4] 钟显, 樊艳芳, 王一波. 双馈集群汇集站主变及送出线路继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 47-54.
ZHONG Xian, FAN Yanfang, WANG Yibo. Research of transformer and outgoing line protection of collection station where cluster of double-fed wind farms put in[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 47-54.

[5] 赵勇, 韩斌, 房刚利. 风力发电机状态监测与故障诊断技术综述[J]. 热力发电, 2016, 45(10): 1-5.
ZHAO Yong, HAN Bin, FANG Gangli. A survey of condition monitoring and fault diagnosis for wind power generators[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(10): 1-5.

[6] 何青, 刘辉, 刘文毅. 风电-压缩空气储能系统火用和火用成本分析模型[J]. 热力发电, 2016, 45(2): 34-39.
HE Qing, LIU Hui, LIU Wenyi. Exergy and exergy cost analysis model for wind-compressed air energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(2): 34-39.

[7] 陈妍君. 电阻型超导限流器和 10 kV 配电网继电保护相配合的仿真分析[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 53-59.
CHEN Yanjun. Simulation of co-ordination of resistive-type superconducting fault current limiter and relay protection in 10 kV distribution network[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2016, 44(5): 53-59.

[8] 王萌, 孙长兴. 耦合共振无线电能传输系统最大效率跟踪控制[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016,44(3): 37-40, 46.
WANG Meng, SUN Changxing. Maximum efficiency tracking control for magnetic resonant coupling based wireless power transfer system[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2016, 44(3): 37-40, 46.

[9] 张保会, 王进, 李光辉. 风力发电机集团式接入电力系统的故障特征分析[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 176-183.
ZHANG Baohui, WANG Jin, LI Guanghui. Analysis on fault features of wind turbine generators concentratedly connected to power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 176-183.

[10] 索南加乐, 王增超, 张健康, 等. 基于参数识别的高阻接地距离保护算法[J]. 中国电机工程学报, 2011,

31(31): 173-178.
SUONAN Jiale, WANG Zengchao, ZHANG Jiankang, et al. A novel distance protection algorithm for high resistance grounding faults based on parameter identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 173-178.

[11] 杨欢红, 李庆博, 寇柯, 等. 双馈风电场的频率特性对距离保护的影响[J]. 高压电器, 2016, 52(9): 116-120.
YANG Huanhong, LI Qingbo, KOU Ke, et al. Impact of frequency characteristics in wind farms based on doubly-fed induction generators wind farm on distance protection[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9): 116-120.

[12] 徐岩, 林旭涛, 赵亮, 等. 大型风电场对工频故障分量距离保护影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 118-125.
XU Yan, LIN Xutao, ZHAO Liang, et al. Research on impact of large wind farms on distance relay using power fault component[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 118-125.

[13] 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 of phase-comparison distance protection based on polarized voltage for outgoing transmission line of DFIG-based wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 74-79.

[14] 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 transfer process-based distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 61-66.

[15] 王晨清, 宋国兵, 汤海雁, 等. 距离保护在风电接入系统中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 10-15.
WANG Chenqing, SONG Guobing, TANG Haiyan, et al. Adaptability analysis of distance protection in power system integration with wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 10-15.

[16] 张保会, 王进, 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, WANG Jin, 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, 33(6): 1-6.

[17] 王欢欢, 宋国兵, 钟高跃, 等. 基于快速相量提取算法的距离保护方案[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3211-3216.
WANG Huanhuan, SONG Guobing, ZHONG Gaoyue, et al. A distance protection scheme based on fast phasor extraction algorithm[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3211-3216.

收稿日期：2016-12-10； 修回日期：2017-02-05

作者简介：

侯俊杰(1993—)，男，硕士研究生，研究方向为可再生能源并网技术与电力系统继电保护；E-mail: 826686025@qq.com

樊艳芳(1971—)，女，通信作者，副教授，硕士生导师，研究方向为电力系统稳定与控制、微电网控制技术；E-mail: 410849062@qq.com

钟 显(1989—)，男，硕士研究生，主要研究方向为集群式风电并网技术及其继电保护。E-mail: zx18673760021@sina.com

(编辑 姜新丽)