

DOI: 10.7667/PSPC171332

# 基于分布参数模型的风电系统长距离送出线时域距离保护

侯俊杰, 樊艳芳

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 传统工频原理距离保护易受风电系统故障特征的影响, 基于集中参数模型的时域距离保护原理较适应于风电系统送出线。但考虑到该原理忽略分布电容的影响, 当故障发生在风电系统长距离送出线时, 可能造成距离 I 段保护发生暂态超越现象。因此, 提出一种基于分布参数模型的风电系统长距离送出线时域距离保护原理。基于分布参数模型, 通过保护安装处的电压、电流时域信息求得距离 I 段整定处的电压、电流时域信息, 代入时域故障测距方程中, 求得整定点与故障发生处的故障距离。通过与距离 I 段整定距离求和获得故障测量距离, 实现保护动作。仿真结果表明, 该原理不受长距离送出线分布电容的影响, 具有较强的抗过渡电阻性能, 优越于基于集中参数模型时域距离保护。

**关键词:** 风电系统; 送出线; 时域; 距离保护; 分布参数模型

## Time domain distance protection for long distance outgoing line of wind power system based on distributed parameter model

HOU Junjie, FAN Yanfang

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

**Abstract:** The traditional distance protection principle based on power frequency is easy to be affected by fault characteristics of wind power system. The time domain distance protection principle based on lumped parameter model is more suitable for the outgoing line of wind power system. However, considering the principle influence of distributed capacitance is neglected, when the fault occurs in the long distance outgoing line of the wind power system, transient transcendence may occur on the distance protection instantaneous relay protection zone. Therefore, this paper presents a time domain distance protection principle for long distance outgoing line of wind power system based on distributed parameter model. Based on the distributed parameter model, it uses the voltage and current time domain information of protection installation to obtain the time domain information of voltage and current at the distance protection instantaneous relay protection zone setting which are brought into time domain fault location equation, thereby the fault distance between the whole set point and the fault point is obtained. By summing the distance of the distance protection instantaneous relay protection zone setting, fault measurement distance is obtained, achieving the protection action. Simulation results show that the principle is not affected by the distributed capacitance of long distance outgoing line, and the performance of anti-transition resistance is good. The protection performance is superior to the time domain distance protection based on the lumped parameter model.

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

**Key words:** wind power system; outgoing line; time domain; distance protection; distributed parameter model

## 0 引言

目前, 面向大规模风电系统送出线保护研究多

停留在适应性分析阶段, 对于适应于风电系统送出线的新型保护原理研究较少。距离保护作为线路保护的重要组成部分, 仍然面临一定的问题, 其中包括过渡电阻、长距离线路分布电容等的影响, 可能导致距离保护出现不正确动作的风险。当故障发生在风电系统送出线时, 因风电侧可能具有频率偏

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(XJGR12017017)

移、弱馈性、谐波含量较高等故障特征, 距离保护原理的性能将进一步受到影响, 亟待学者们探究适应于风电系统送出线的新型距离保护原理。

目前国内外学者已针对距离保护展开了一定的研究。文献[1-16]对工频原理距离保护在风电系统送出线的适应性展开研究。研究结论表明基于工频量距离保护原理易受风电侧频率偏移、弱馈性的影响可能造成保护不正确动作; 风电系统正负序阻抗变化可能导致工频变化量距离保护原理适应性存在问题。因此, 基于工频原理的距离保护在风电系统送出线的适应性存在一定问题, 为克服上述问题, 距离保护算法应在时域中实现<sup>[9-12]</sup>。文献[17-19]提出了适应于风电系统的时域距离保护原理, 均基于集中参数线路 RL 模型, 但因忽略分布电容的影响, 当故障发生在长距离线路时, 仍存在一定问题。文献[20]提出了抗高阻接地时域距离保护原理, 该原理将时域方程进行重构, 增加过渡电阻待识别量, 抗过渡电阻性能良好, 在中短距离送出线适应性较好, 但该原理仍未考虑长距离送出线分布电容的影响。因此, 本文重点解决时域距离保护原理在长距离送出线路易受分布电容影响的问题, 同时兼顾过渡电阻的影响。

文中提出利用分布参数模型, 构建风电系统长距离送出线时域距离保护原理。文中首先基于分布参数模型<sup>[13]</sup>, 利用保护安装处提取的电压/电流时域信息获得距离 I 段整定处的电压、电流时域电气量, 代入时域故障测距方程, 获得整定点与故障发生处的故障距离, 通过与距离 I 段整定距离求和获得故障测量距离, 实现保护动作。最后通过仿真验证保护原理的有效性。

## 1 基于集中参数模型的时域距离保护在长距离风电系统送出线的局限性

### 1.1 基于集中参数的线路模型

基于集中参数线路模型就是利用 R-L 模型将故障线路用电阻和电感进行表示, 如图 1 所示。

图 1 中,  $u(t)$ 、 $i(t)$  分别表示风电侧保护安装处的电压/电流时域电气量信息;  $i_f(t)$  表示流过过渡电阻的电流;  $R_1$ 、 $L_1$  表示故障线路电阻和电感值;  $R_g$  为过渡电阻的阻值。

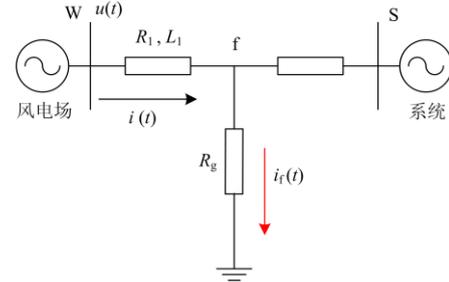


图 1 电路等效图

Fig. 1 Circuit equivalent diagram

当 f 点发生单相经过渡电阻接地故障时, 则下列方程成立:

$$u(t) = R_1 i(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} + i_f(t) R_g \quad (1)$$

当发生单相接地故障, 式中的  $i(t)$  需要零序补偿, 以补偿相的电流为例,  $i(t) = i_\phi(t) + 3K_r i_0(t)$ ,  $i_0(t)$  为场侧线路的零序电流, 由零模变换求得;  $i_\phi(t)$  为保护安装处故障相电流;  $K_r$  表示零序电阻补偿系数, 其中  $K_r = (r_0 - r_1) / 3r_1$ ,  $r_0$ 、 $r_1$  分别为线路单位长度的零序、正序电阻。  $di(t)/dt = d(i_\phi(t) + 3K_1 i_0(t)) / dt$ , 式中,  $K_1$  表示零序电感补偿系数, 其中  $K_1 = (l_0 - l_1) / 3l_1$ ,  $l_0$ 、 $l_1$  分别为线路单位长度的零序、正序电感。

当发生相间短路故障时,  $u(t)$ 、 $i(t)$  分别表示风电侧保护安装处的线电压和相电流差。

### 1.2 时域距离保护

以单相接地故障为例, 此时式(1)中共有  $R_1$ 、 $L_1$ 、 $R_g$ 、 $i_f(t)$  四个未知量, 不适宜利用线性方程组进行求解, 故式(1)可表示为

$$u(t) = L_1 \left[ \frac{R_1}{L_1} i(t) + \frac{di(t)}{dt} \right] + i_f(t) R_g \quad (2)$$

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。其中  $i_0(t)$  为风电侧流过的零序电流。通过对方程组进行变形, 可得时域故障测距方程为

$$u(t) = L_1 \left[ \frac{R_1}{L_1} \cdot i(t) + \frac{di(t)}{dt} \right] + 3i_0(t) R'_g \quad (3)$$

式(3)中:  $R'_g$  为等效的过渡电阻;  $R_1/L_1$  可由线路参数直接求得, 为已知量; 式中只有  $L_1$  和  $R'_g$  两个未知数需要求解。

对式(3)进行离散化, 利用差分形式替代微分形式, 选取特定数据窗长度, 运用最小二乘法进行求解, 获得测量电感值  $L_1$ 。

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 段保护的動作判据。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。

发生相间短路时, 则过渡电阻  $R_g$  为零, 测量电阻、电感值  $R_1$ 、 $L_1$  的求解方法与发生单相故障时求解方法相同。

### 1.3 在风电系统长距离送出线的局限性

由式(1)可知, 该原理以 R-L 模型为基础, 忽略了分布电容参数, 应用于短距离送出线时, 模型精度较高; 但故障发生在长距离送出线时, 分布电容含量显著增加, 高频分量含量丰富, 基于集中参数线路模型式(1)将无法准确模拟长距离送出线, 该原理存在保护不正确动作的风险。

## 2 基于分布参数线路模型的风电系统长距离送出线时域距离保护

### 2.1 基于分布参数模型的基本思想

考虑到在 1.3 节中, 基于集中参数线路模型的时域距离保护原理在长距离风电系统送出线的局限性, 提出将故障测量距离进行分段。在考虑分布电

容影响的分布参数模型下, 利用风电侧保护安装处电压/电流时域电气量信息获得分段处的电压/电流电气量, 代入时域故障测距方程中, 求解得到分段点到故障点的距离, 最后与保护安装处到分段点处的距离进行求和, 获得故障测量距离。

该思想在很大程度上缩短了利用集中参数线路模型的故障测距方程求解的测量距离, 从而减少因长距离送出线分布电容引起的适应性问题。

另外, 分段点的选择也决定了保护性能的好坏。由于本文重点针对长距离送出线距离 I 段区外发生暂态超越现象的问题, 因此在原理上将分段点选择在距离 I 段整点处为宜。这样不仅可以在距离 I 段区外(送出线末端)发生故障时, 能够准确地计算故障距离, 保证保护正确不动作; 而且也能保证在故障发生在距离 I 段区内时, 保护能够正确动作。

### 2.2 分布参数线路模型下的电压/电流求解方法

针对风电系统长距离送出线, 需考虑分布电容参数的影响。通过引入分布参数模型<sup>[21]</sup>, 该模型反映线路沿线电压、电流, 其中距离  $x$  和时间  $t$  为变量。则故障线路沿线电流、电压表达式如式(4)和式(5)。

$$i(x,t) = \frac{1}{2Z_c} \left[ \frac{Z_c + \frac{rx}{4}}{Z_c} \left[ u\left(t + \frac{x}{v}\right) - i\left(t + \frac{x}{v}\right)(Z_c + \frac{rx}{4}) \right] - \frac{1}{2Z_c} \left[ \frac{Z_c - \frac{rx}{4}}{Z_c} \left[ u\left(t - \frac{x}{v}\right) - i\left(t - \frac{x}{v}\right)(Z_c - \frac{rx}{4}) \right] - \frac{1}{2Z_c} \cdot \frac{rx}{2Z_c} \left[ u(t) - i(t) \cdot \frac{rx}{4} \right] \right] \right] \quad (4)$$

$$u(x,t) = \frac{1}{2} \left| \frac{Z_c + \frac{rx}{4}}{Z_c} \right|^2 \left[ u\left(t + \frac{x}{v}\right) - i\left(t + \frac{x}{v}\right)(Z_c + \frac{rx}{4}) \right]^2 + \frac{1}{2} \left| \frac{Z_c - \frac{rx}{4}}{Z_c} \right|^2 \times \left[ u\left(t - \frac{x}{v}\right) + i\left(t - \frac{x}{v}\right)(Z_c - \frac{rx}{4}) \right]^2 - \left(\frac{rx}{4Z_c}\right)^2 u(t)^2 - \frac{rx}{4} \cdot \left[ \frac{Z_c + \frac{rx}{4}}{Z_c} \right] \left[ \frac{Z_c - \frac{rx}{4}}{Z_c} \right] \cdot i(t) \quad (5)$$

式中:  $u(t)$ 、 $i(t)$  分别为风电侧保护安装处电压/电流时域信息;  $v$  为波速, 其表达式为  $v=1/(LC)^{0.5}$ , 其中  $L$ 、 $C$  分别表示线路单位长度电感、电容;  $Z_c$  表示送出线路的特性阻抗,  $Z_c=(LC)^{0.5}$ ;  $x$  表示送出线路任意一点距风电侧保护安装处的距离;  $r$  表示线路

单位长度电阻。

式(4)和式(5)均基于单相线路, 对于三相线路, 需先对保护安装处的相电压、电流进行 Clark 变换, 将相空间变换到模空间, 使其转化为相互独立的模量。由式(4)和式(5)可知, 考虑到求解电流、电压的

瞬时值时, 由于其中的  $x/v$  不一定是数据选取的采样间隔的整数倍, 为简化运算, 统一选取离  $t-x/v$  附近前后采样点采用线性差值法求取该采样点间数据。

### 2.3 保护算法的实现

引入第 2.2 节中分布参数模型, 利用风电侧保护安装处电压、电流时域信息获得整定点电压、电流信息, 代入第 1.2 节式(3)中, 获得整定点到故障点的距离, 最后确定故障测量距离, 实现保护动作。

当故障发生在距离 I 段区外时, 整定点位于故障点之前, 如图 2 所示。

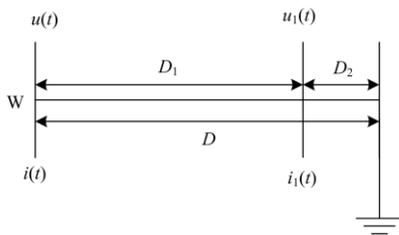


图 2 区外故障等效图

Fig. 2 External fault equivalent

图 2 中, W 表示风电侧保护安装处,  $u(t)$ 、 $i(t)$  分别为风电侧保护安装处电压、电流时域电气量信息;  $u_1(t)$ 、 $i_1(t)$  分别为整定点处的电压、电流时域信息;  $D_1$  为保护安装处到整定点处的距离;  $D_2$  为整定点到故障点的距离;  $D$  表示保护安装处到故障点的故障测量距离。

此时风电侧保护安装处的电流方向与整定点处的电流方向一致。根据风电侧保护安装处电压、电流获得整定点处的电压( $u_1(t)$ )、电流( $i_1(t)$ ), 代入 1.2 节式(3)中, 求解得到整定点到故障点距离  $D_2$ , 通过与保护安装处到整定点距离  $D_1$  进行求和, 得到故障测量距离  $D$ , 并计算得到测量阻抗值  $Z_1$ , 当测量阻抗值大于整定阻抗值时, 判定为区外故障。

当故障发生在距离 I 段区内时, 整定点位于故障点之后, 如图 3 所示。

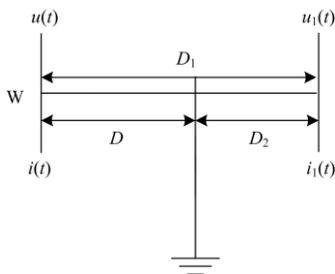


图 3 区内故障等效图

Fig. 3 Internal fault equivalent

由图 3 可知, 发生区内故障时, 利用风电侧保护安装处电压、电流获得整定点处电压( $u_1(t)$ )、电流( $i_1(t)$ ), 代入 1.2 节式(3)中, 求解得到整定点到故障点距离  $D_2$ , 由于整定点处的电流方向与风电侧保护安装处电流方向相反, 此时  $D_2$  为负值, 通过与保护安装处到整定点距离  $D_1$  进行求和, 得到故障测量距离  $D$ , 并计算得到测量阻抗值  $Z_1$ , 当测量阻抗值大于整定阻抗值时, 判定为区内故障。

由上述分析可知, 无论风电系统送出线发生区内、区外故障, 均可利用整定点到故障点的距离, 并与风电侧保护安装处到整定点的距离进行求和, 最终获得测量故障距离, 实现保护的動作。该原理基于时域电气量信息, 不受风电侧故障特性影响, 并且考虑长距离送出线路分布电容参数, 在原理上同样适应于风电系统长距离送出线。

### 3 保护原理验证

基于某地区双馈风电系统送出线实际网架结构参数数据, 如图 4 所示, 利用 PSCAD 软件获得风电系统故障仿真数据, 运用 Matlab 软件对算法进行编程, 实现保护动作。

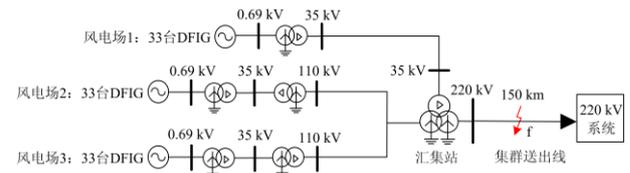


图 4 双馈风电接入系统图

Fig. 4 DFIG power connected to grid

系统仿真参数如下, 双馈风电系统汇集站送出线电压等级为 220 kV, 汇入 220 kV 大电网系统, 该系统为无穷大系统, 双馈风电机组额定容量为 1.5 MW, 额定电压为 0.69 kV, 双馈机组处于欠同步状态( $s=0.8$ ), 定子阻抗为  $0.00846+j0.135$  p.u., 转子阻抗为  $0.00725+j0.142$  p.u., 励磁电感为 3.465 p.u.。双馈风电系统汇集站主变额定容量 400 MW, 额定电压 38.5/121/230 kV, 电压百分比  $U_{k12}(\%)=8$ ,  $U_{k23}(\%)=15$ ,  $U_{k13}(\%)=24$ , 送出线长度为 150 km, 单位正序线路电阻、电感、电容分别为  $0.052 \Omega/\text{km}$ 、 $1.080 \text{ mH}/\text{km}$ 、 $0.013 \mu\text{F}/\text{km}$ ; 常规电源的正、零序系统阻抗分别为  $2.41+j54.38 \Omega$ 、 $1.2+j17.6 \Omega$ ; 单位零序线路电阻、电感、电容分别为  $0.29 \Omega/\text{km}$ 、 $2.7 \text{ mH}/\text{km}$ 、 $0.009 \mu\text{F}/\text{km}$ 。双馈风电送出线路中点 f 处发生 A 相接地故障, 过渡电阻为  $0.1 \Omega$ , 故障持续 0.1 s, 故障后机组投入 Crowbar 电路, 仿真结果如图 5 所示。

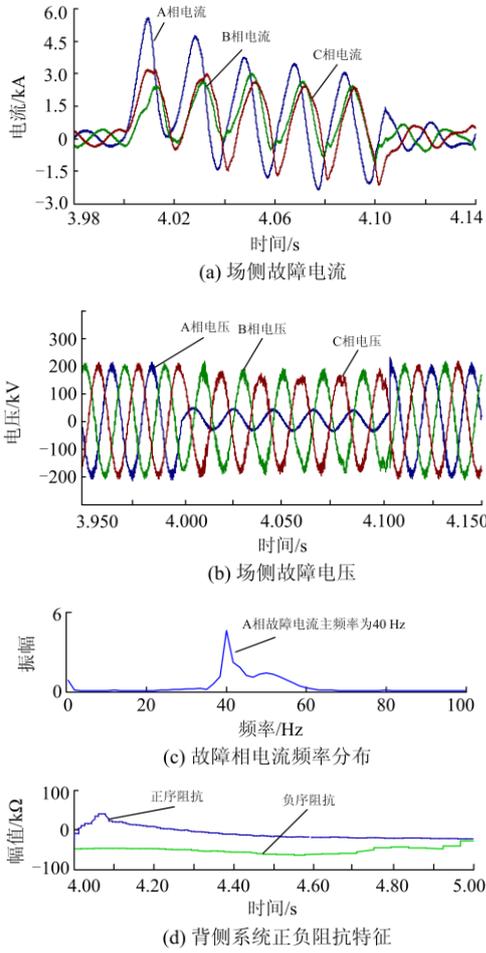


图 5 双馈风电故障特征

Fig. 5 DFIG wind farm fault characteristics

由仿真结果可知：双馈风电侧故障电流与非故障相电流相位基本一致，弱馈性较为明显(图 5(a))；变流器中含有的大量电力电子器件会产生大量谐波(图 5(b))；风电侧电流频率与转子故障前频率有关，电流的主频率发生偏移(图 5(c))；双馈风机低电压穿越的暂态控制策略变化，使得其正负序等效阻抗将发生改变(图 5(d))。综上可知，风电系统的故障特征区别于常规能源系统。

### 3.1 单相经过渡电阻接地故障时两种保护原理对比

对基于集中参数模型的时域距离保护和本文提出的基于分布参数模型线路的时域距离保护原理在送出线距离 I 段发生区内、区外经  $100 \Omega$  接地故障时的保护性能进行测试验证。考虑距离保护对暂态超越的明确规定：距离 I 段整定值 95% 之内的保护可靠动作，距离 I 段整定值 105% 之外的保护严格不动作，因此选取区内故障为距离 I 段 95% 处 (115 km)，区外故障为距离 I 段 105% 处 (134 km)，距离 I 段按照全长的 85% 进行整定，采样频率选为

4 000 Hz，选取故障后的 10 ms 构成数据窗长度，以滑窗的形式利用故障发生后 0.04 s 内的数据对保护元件进行保护判定：若测量阻抗始终在整定阻抗圆内，判定为区内故障；反之，测量阻抗始终落在整定阻抗圆外，判定为区外故障；若测量阻抗不稳定，则判定保护结果不稳定。保护动作情况及测距结果如图 6 和图 7 所示。

#### 1) 区内故障(距离 I 段保护范围 95% 处)

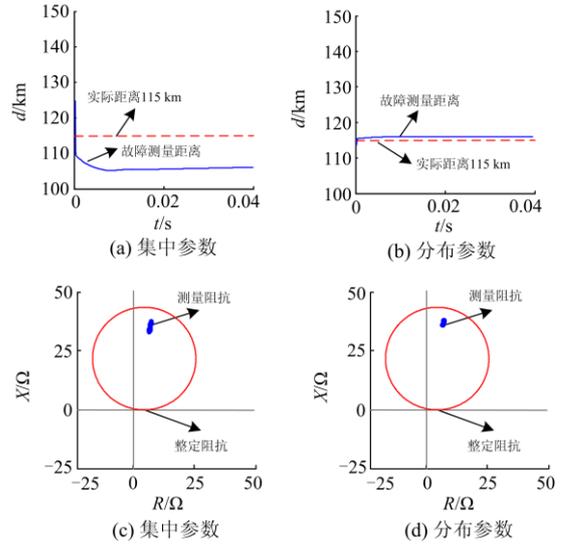


图 6 两种保护原理的故障测距及保护动作结果

Fig. 6 Fault location and protection action results of two kinds of protection principles

#### 2) 区外故障(距离 I 段保护范围 105% 处)

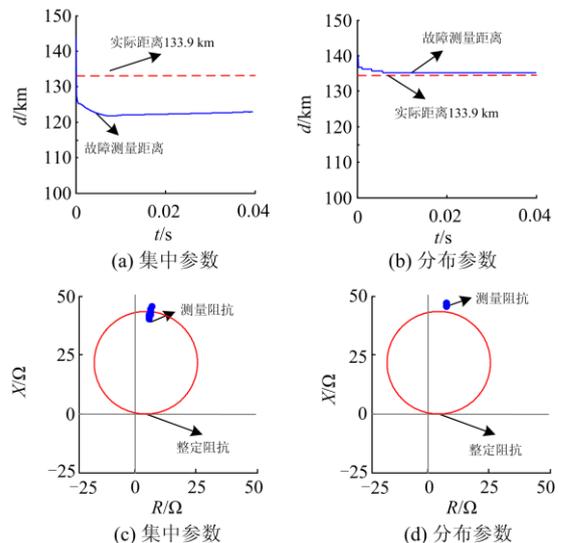


图 7 两种保护原理的故障测距及保护动作结果

Fig. 7 Fault location and protection action results of two kinds of protection principles

将保护动作结果及故障测距结果汇总至表 1。

表 1 故障测距及保护动作结果汇总

Table 1 Fault location and protection results summary

测距及 动作结果	95%处 测距/km	105%处 测距/km	95%处 保护动作	105%处 保护动作
集中参数	106.2	122.3	区内正确动作	区外误动作
分布参数	116.1	134.6	区内正确动作	区外不动作

由表1可以得出,当风电系统送出线发生过渡电阻接地故障时,基于集中参数线路模型的时域距离保护不受风电侧故障特征的影响,抗过渡电阻性能较好,但送出线发生距离I段区外故障时,易造成距离I段暂态超越现象,保护性能受到影响。基于分布参数模型的时域距离保护测距精度较高,抗过渡电阻性能良好,并且在区内外均能正确动作。

### 3.2 相间故障时两种保护原理对比

工况及保护算法处理过程同 3.1 节所示,对两种保护原理在风电系统送出线发生三相相间短路故障进行仿真对比,其中以 AB 相相间阻抗继电器为例。保护动作情况及测距结果如图 8 和图 9 所示。

#### 1) 区内故障(距离 I 段保护范围 95%处)

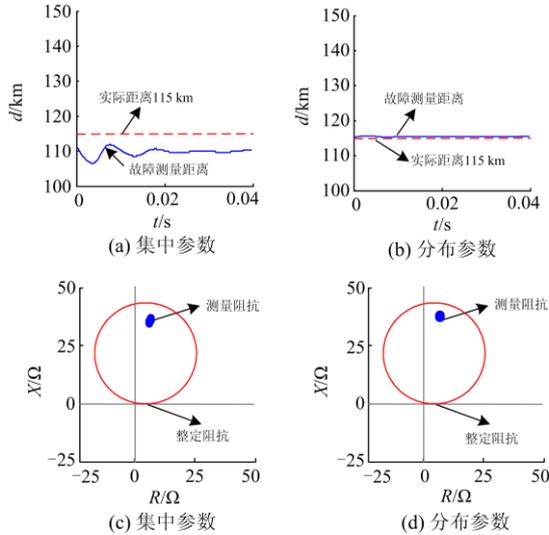


图 8 两种保护原理的故障测距及保护动作结果

Fig. 8 Fault location and protection action results of two kinds of protection principles

#### 2) 区外故障(距离 I 段保护范围 105%处)

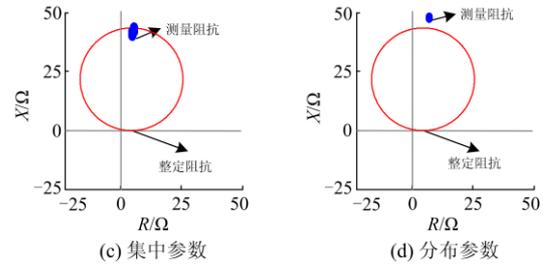
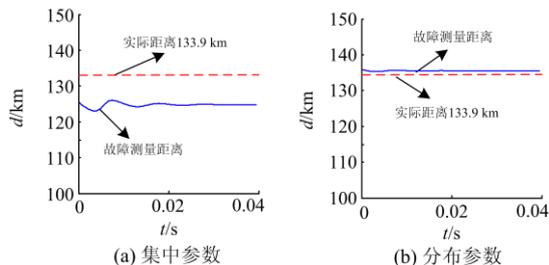


图 9 两种保护原理的故障测距及保护动作结果

Fig. 9 Fault location and protection action results of two kinds of protection principles

将保护动作结果及故障测距结果汇总至表 2。

表 2 故障测距及保护动作结果汇总

Table 2 Fault location and protection results summary

测距及动作 结果	95%处 测距/km	105%处 测距/km	95%处 保护动作	105%处 保护动作
集中参数	109.4	124.1	区内正确动作	区外误动作
分布参数	115.8	135.2	区内正确动作	区外不动作

由表2可知,当送出线发生相间短路故障时,基于集中参数线路模型的时域距离保护不受风电侧故障特征的影响,但送出线发生距离I段区外故障时,易造成距离I段暂态超越现象,保护性能受到影响。而基于分布参数模型的时域距离保护测距精度较高,在区内外发生故障时保护均能正确动作。

### 3.3 两种距离保护在风电系统送出线的测距精度仿真对比

工况与仿真参数同 3.1 节所示,为进一步仿真对比两种保护原理的测距精度,统一选取 0.04 s 内测量阻抗值的平均值获得故障距离  $l_1$ , 定义测距偏差  $e$ ,  $e=(l_1-l)/l$ , 式中,  $l$  为实际故障距离。以发生单相经  $100 \Omega$  接地故障在距风电侧 50 km、70 km、90 km、110 km、130 km、150 km 处为例,对两种保护原理在集群风电送出线的测距精度进行仿真对比,如表 3 所示。

表3 风电系统送出线故障测距精度对比

Table 3 Comparison of wind power outgoing line fault location accuracy

故障距离/ km	测量距离/km (集中参数)	偏差率/% (集中参数)	测量距离/km (分布参数)	偏差率/% (分布参数)
50	48.5	-3.0	48.7	-2.6
70	66.2	-5.4	69.1	-1.28
90	84.3	-6.3	90.9	1.0
110	102.4	-6.9	111.2	1.1
130	119.5	-8.07	131.5	1.2
150	132.7	-11.5	152.2	1.4

由表 3 可知,集中参数模型下的时域距离保护原理的测距精度随着故障距离的增加而降低,该方法的测量距离小于真实故障距离,并且误差较大。当故障发生在风电系统送出线距离 I 段区外时,极易造成保护的误动,即暂态超越现象,该原理的保护性能受到影响。但考虑到该原理的抗过渡电阻性能良好,在中短距离送出线适应性较为理想。

本文提出的基于分布参数模型下的风电系统送出线时域距离保护原理测距精度较高,且不受长距离送出线路分布电容的影响,抗过渡电阻性能良好,在风电系统短/长距离送出线中,保护均能正确可靠动作。

#### 4 结论

通过对上述两种保护原理在双馈集群送出线的适应性分析,可得以下结论:

1) 基于集中参数线路模型的时域距离保护原理,不受风电侧故障特征的影响,适用于风电系统中短距离送出线路,并且抗过渡电阻性能良好。但该原理忽略了分布电容的影响,当故障发生在长距离送出线路末端即送出线距离 I 段区外时,保护极易发生暂态超越现象,保护性能受到影响。

2) 基于分布参数模型的风电系统送出线时域距离保护原理继承了基于集中参数线路模型的时域距离保护的优点,利用分布参数线路模型,将保护安装处的电压电流时域信息代入时域故障测距方程中,减少了长距离送出线路分布电容的影响。不但适用于短距离送出线,在风电长距离送出线中同样适用,且具有良好的抗过渡电阻性能。

#### 参考文献

- [1] ZHONG Xian, FAN Yanfang. Study on LVRT coordinate control strategy of DFIG when considering non-rotor side crowbar protection[J]. Journal of Computational Information Systems, 2015, 11(18): 6747-6757.
- [2] 毕天姝, 李彦宾, 马丽红, 等. 风场及其送出线保护配置与整定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 45-50.  
BI Tianshu, LI Yanbin, MA Lihong, et al. Configuration and setting of relay protection for wind farm and its outgoing line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 45-50.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 陈学伟, 高厚磊, 向珉江, 等. 基于电子式互感器微分输出的改进 R-L 模型距离保护算法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 283-289.  
CHEN Xuewei, GAO Houlei, XIANG Minjiang, et al. Improved R-L model distance protection algorithm based on differential output of electronic transducers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 283-289.
- [10] 鲁文军, 林湘宁, 黄小波, 等. 一种采用浮动门槛的自

- 适应突变量距离保护方案[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 160-165.
- LU Wenjun, LIN Xiangning, HUANG Xiaobo, et al. A scheme of adaptive fault component distance protection using float threshold[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 160-165.
- [11] 刘家军, 闫泊, 姚李孝, 等. 平行双回线中串补电容对零序电抗型距离保护的影响[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 264-270, 255.
- LIU Jiajun, YAN Bo, YAO Lixiao, et al. Influence of series compensation capacitor on zero-sequence reactance-type distance protection in parallel double-circuit lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 264-270, 255.
- [12] 邬捷龙. 继电保护测试技术的现状与展望[J]. 陕西电力, 2016, 44(3): 77-80.
- WU Jielong. Status and development of protective relay test technology[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(3): 77-80.
- [13] 魏占朋, 彭妮娜. 双馈风电机组短路电流特性分析[J]. 陕西电力, 2016, 44(6): 18-21.
- WEI Zhangpeng, PENG Nina. Short circuit current analysis of DFIG[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(6): 18-21.
- [14] 周春阳, 胡忠山, 焦华. 断路器检修状态下感应电流对继电保护的影响[J]. 广东电力, 2016, 29(8): 67-70, 78.
- ZHOU Chunyang, HU Zhongshan, JIAO Hua. Influence of induced current of breaker on relay protection in the state of maintenance[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(8): 67-70, 78.
- [15] 何智祥, 曾永浩, 梁唐杰, 等. 基于负载电压偏移的自适应零线断线保护原理与实现[J]. 广东电力, 2016, 29(10): 116-120.
- HE Zhixiang, ZENG Yonghao, LIANG Tangjie, et al. Protection principle for self-adaptive zero line disconnection based on load voltage excursion and its implementation[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(10): 116-120.
- [16] 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.
- [17] 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 Wulue, 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 侯俊杰, 樊艳芳, 钟显, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 122-128.
- HOU Junjie, FAN Yanfang, ZHONG Xian, et al. Research on high resistance grounding time domain equation based distance protection for wind power accessed power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 122-128.
- [21] 宋国兵, 索南家乐, 许庆强, 等. 基于双回线环流的时域法故障定位[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 24-29.
- SONG Guobing, SUONAN Jiale, XU Qingqiang, et al. A novel time-domain algorithm for locating faults on parallel transmission lines by circulating circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 24-29.

收稿日期: 2017-09-06; 修回日期: 2018-02-01

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, 副教授、硕士生导师, 主要研究方向为新能源并网技术、电力系统保护与控制。E-mail: 410849062@qq.com

(编辑 魏小丽)