

一种抗暂态超越的集群风电送出线时域方程模型 误差修正距离保护

樊艳芳,侯俊杰,晁勤,王一波

(新疆大学 电气工程学院,新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 双馈风电系统谐波含量高、频率偏移、弱馈性等故障特征造成传统工频距离保护存在适应性问题;时域距离保护在风电短距离送出线路中适应性较好,但在风电长距离送出线中受分布电容的影响易发生距离Ⅰ段暂态超越现象。提出一种抗暂态超越的集群风电送出线时域方程模型误差修正距离保护。从长距离送出线距离保护适应性角度出发,分析基于集中参数线路模型的时域方程模型误差,提出基于时域方程模型误差的时域距离保护测量电抗修正方法,并考虑过渡电阻参数的影响,构建适用于集群风电长距离送出线距离保护动作判据。通过新疆某地区集群双馈/直驱集群风电送出线发生故障时的实验数据,测试验证了所提出的时域方程模型误差修正距离保护能较好地适用于各类型集群风电长距离送出线,有效地避免距离Ⅰ段区外发生故障时的暂态超越现象,并且抗过渡电阻性能良好。

关键词: 风电; 风电集群; 送出线; 距离保护; 时域方程; 模型误差

中图分类号: TM 77; TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.002

0 引言

风电大规模集中式并网带来的送出线故障特征较常规能源线路发生了较大变化^[1-3],尤其是当故障发生在含多种风机类型的集群风电送出线时,电网故障特征将发生明显改变。继电保护作为电网安全运行的第一道防线,其意义尤为重要。其中距离保护因可靠性高、保护范围大等特点,广泛作为110 kV及以下电压等级的主保护和220 kV及以上电压等级线路的后备保护^[4-6]。但现有距离保护是基于常规能源线路故障特征提出的,应用于集群风电接入系统时存在适应性问题,可能引起集群风电送出线距离保护不正确动作,存在安全隐患。

目前国内外学者针对距离保护已进行了一定的研究。文献[7-9]分别从双馈风电场送出线频率特征、弱馈性以及风机自身运行特性出发,分析了以上因素对距离保护的影响,得出基于工频原理的保护算法在双馈风电场中存在适应性问题的结论。文献[10-11]从时域的角度提出了适用于风电接入系统的R-L模型距离保护,但研究中忽略了长线路分布电容的影响,在短距离输电线路中测距精度较高,而在长距离送出线中,其测量阻抗值出现较大偏差,极易造成距离Ⅰ段保护发生暂态超越现象。文献[12-13]

对距离保护暂态超越现象展开研究,指出影响暂态超越的主要因素一方面受长距离输电线路分布电容产生的高频分量的影响,一方面还受电压互感器传变特性的影响。应用于500 kV及以上电压等级的超/特高压系统的电容式电压互感器,其传变误差将带来暂态超越影响。而应用于220 kV及以下电压等级的系统的电磁式电压互感器传变性能良好,原理上不会出现暂态超越现象。由于集群风电送出线电压等级一般以220 kV为主,故本文主要针对集群风电长距离送出线分布电容产生的高频分量引起的暂态超越现象展开研究。

集群风电场多位于偏远地区,其送出线距离较长。针对集群风电场长距离送出线距离Ⅰ段保护易发生暂态超越的问题,本文从时域分析的角度提出一种基于时域方程模型误差修正的距离保护。通过对长距离送出线分布电容的影响特征进行分析,得出时域方程模型误差是导致保护安装处测量电抗值存在误差的主要原因,然后兼顾过渡电阻带来的影响,提出对测量电抗值进行修正的方法,并进一步得到距离保护判据,实现保护正确动作。结合新疆某地区集群风电送出线发生故障时的实验数据,对本文提出的新型距离保护原理在各类型集群风电场送出线中的适应性进行测试验证。

1 时域方程模型及时域距离保护应用于风电的适应性分析

1.1 不计及过渡电阻影响的时域方程模型

传统工频量距离保护因面向线路,在原理上不受风电接入系统的影响,但其原理采用快速傅里叶变

收稿日期:2017-05-07;修回日期:2017-11-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51467019);国家自然科学基金国际合作专项资助项目(2013DFG61520);2017年新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJGRI2017017)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51467019), International Science & Technology Cooperation Program of China(2013DFG61520) and Research Projects for Xinjiang Uygur Autonomous Region Graduate Students in 2017(XJGRI2017017)

换(FFT)提取故障信息,当故障发生在集群风电送出线时,可能导致场侧电流频率发生偏移并引起大量谐波注入,造成故障信息的提取出现较大偏差,工频量距离保护性能受到影响。所以应用于集群风电送出线时,传统距离保护存在适应性问题。而时域距离保护的时域方程模型即 R-L 模型由于面向线路和从时域角度出发,原理上不受电网频率及背侧电源变化的影响,所需时间窗较短,测距较为精准,相对更适用于风电接入系统的送出线。

时域距离保护的时域方程模型基于集中参数线路模型,将故障点到保护安装处的线路用电阻和电感串联电路来表示,即等效为 R-L 模型,如图 1 所示。

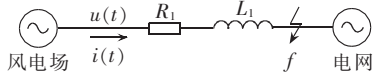


图 1 电路等效图

Fig.1 Diagram of equivalent circuit

点 f 发生短路故障时,有下列方程成立:

$$u(t) = R_1 i(t) + L_1 di(t)/dt \quad (1)$$

其中, R_1 、 L_1 分别为保护安装处到故障点的正序电阻和电感值; $u(t)$ 、 $i(t)$ 分别为保护安装处的电压、电流瞬时值。

1.2 计及过渡电阻影响的时域方程模型

传统时域方程模型(式(1))未充分考虑过渡电阻参数对保护性能的影响,因此本文在传统时域方程模型的基础上,增加过渡电阻待识别量,对时域方程(式(1))进行重构,如式(2)所示。

$$u(t) = R_1 i(t) + L_1 di(t)/dt + i_t(t) R_g \quad (2)$$

其中, $i_t(t)$ 为流过过渡电阻的电流; R_g 为过渡电阻。

1.3 时域距离保护

对时域方程模型式(2)进行离散化处理,利用差分形式替代微分形式,构建时域距离保护。

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 $i_t(t)$ 进行近似等效。对于单相接地故障,一般假设故障点两侧的零序网络阻抗角近似相等,流过保护安装处与故障点的零序电流同相位,近似可得 $i_t(t) = 3i_0(t)/N$, $i_0(t)$ 为风电侧流过的零序电流, N 为保护安装处零序电流分配系数。通过对方程组进行变形,可得:

$$u(t) = L_1 (R_1 i(t) / L_1 + di(t) / dt) + 3i_0(t) R'_g \quad (3)$$

其中, $R'_g = R_g / N$ 。

将式(3)进行离散化,并且利用最小化误差的平方和,寻找数据的最佳函数匹配,对方程组进行求解,如式(4)所示。

$$Y = \sum_{j=2}^{M/T_s} \left[u(j) - L_1 \left(\frac{R_1}{L_1} i(j) + \frac{i(j) - i(j-1)}{T_s} \right) - 3R'_g i_0(j) \right]^2 \quad (4)$$

其中, $i(j)$ 、 $u(j)$ 分别为第 j 个采样点的采样瞬时值;

$i_0(j)$ 为第 j 个采样点对应的零序电流瞬时值; T_s 为故障信息的采样间隔; M 为数据窗长度。

求解得到测量电感值 L'_1 、等效过渡电阻 R'_g , 利用 L'_1 得到故障距离并计算测量电阻值 R'_1 , 构成测量阻抗值 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,如式(5)所示。

$$Z'_1 < Z_{set} \quad (5)$$

当 $Z'_1 < Z_{set}$ 时,判定为区内故障,保护动作;否则,判定为区外故障。

为提高测量阻抗值的运算精度,采用滑窗形式,在一定的数据长度内,将所选取的数据窗以顺移的方式进行数据运算。

1.4 应用于风电的保护适应性分析

风电接入系统送出线发生单相接地故障时,式(2)中的电压 $u(t)$ 即为故障相电压,电流 $i(t)$ 即为故障相电流与零序补偿电流之和,零序补偿电流可利用 Clark 变换求解零模电流得到,时域方程表达式为:

$$u_\phi(t) = R_1 (i_\phi(t) + K_r 3i_0(t)) + L_1 \frac{d(i_\phi(t) + K_l 3i_0(t))}{dt} - i_t(t) R_g \quad (6)$$

其中, ϕ 为故障相; K_r 和 K_l 分别为电阻和电感的零序补偿系数。

$$K_r = (r_0 - r_1) / (3r_1) \quad (7)$$

$$K_l = (l_0 - l_1) / (3l_1) \quad (8)$$

其中, r_0 、 r_1 和 l_0 、 l_1 分别为单位长度线路的零序、正序电阻和电感值。

由式(6)可知,从时域角度出发所提取的电气量信息 $u_\phi(t)$ 、 $i_\phi(t)$ 为保护安装处的时域瞬时值,故不受电网频率影响;同时由图 1 可知,时域方程距离保护因面向线路,不受背侧电源变化的影响,故障测距精度较高。

式(1)~(8)中只考虑了集中参数线路模型下的阻感参数模型,而不计分布电容的影响,在集群风电短距离送出线中,故障测距精度较高,适应性较好。

2 基于时域方程模型误差修正的距离保护

2.1 时域方程模型误差产生机理

当送出线长度小于 80 km 时属于短距离输电线路,分布电容含量低,可以直接利用集中参数线路模型来表示,而忽略分布电容带来的误差影响;当送出线长度大于 80 km 时,属于长距离输电线路,需要考虑分布电容产生的高频分量的影响。但时域方程(式(2))基于集中参数 R-L 模型,未考虑分布电容参数,将无法准确模拟集群风电长距离送出线,原时域方程(式(2))将存在一定的误差。方程左右两边将不再相等,时域方程将出现不平衡量,如式(9)所示。

$$u(t) - R_1 i(t) - L_1 di(t)/dt - i_t(t) R_g \neq 0 \quad (9)$$

此时,若仍利用原时域方程模型求解测量阻抗值,将存在较大误差,当距离保护 I 段发生区外故障

时,距离保护 I 段可能出现非选择性动作,即发生距离保护 I 段暂态超越现象,其适应性存在一定问题。

本文主要针对暂态超越问题展开研究,而过渡电阻引起的超越问题属于稳态超越,并且文中采用的时域方程本身具有一定的抗过渡电阻能力,保护性能受测量电阻值影响很小。限制保护动作范围及决定保护是否发生暂态超越现象的主要因素均受测量电抗值大小的影响,因此可以利用基于集中参数模型的时域方程模型误差,对时域方程求解得到的测量电抗值进行修正。

2.2 时域模型误差修正方法

式(9)表明,时域距离保护将导致保护安装处的测量电抗值出现偏差,方程等号左侧即为时域方程模型的不平衡量。

定义线路实际电抗值 X_1 与测量电抗值 X'_1 的偏差为:

$$E = (X_1 - X'_1) / X_1 \quad (10)$$

其中, E 为测量电抗值偏差。

由 2.1 节分析可知,时域方程模型的误差是导致长距离输电线路测量电抗值出现偏差的主要原因。真正决定模型误差的不是时域方程本身不平衡量大小,而是时域方程模型不平衡量与所有输入信号分量的比值,记作时域方程模型误差。因此可将测量电抗值偏差与式(11)进行近似等效。

$$E \approx \frac{\sum_{j=2}^{M/T_s} |u(j) - R_1 i(j) - L_1 \frac{i(j) - i(j-1)}{T_s} - i_t(j) R_g|}{\sum_{j=2}^{M/T_s} |u(j)|} \quad (11)$$

利用 1.2 节时域距离保护的求解通式及求解结果,将测量电抗值偏差式(11)进一步表示为:

$$E \approx \frac{\sum_{j=2}^{M/T_s} |u(j) - L'_1 \left[\frac{R'_1}{L'_1} i(j) + \frac{i(j) - i(j-1)}{T_s} \right] - 3R'_g i_0(j)|}{\sum_{j=2}^{M/T_s} |u(j)|} \quad (12)$$

发生相间短路故障时,过渡电阻 R_g 为 0,以发生 AB 相相间故障为例,则式(12)可表示为:

$$E \approx \frac{\sum_{j=2}^{M/T_s} |u_{AB}(j) - R'_1 i_{AB}(j) - L'_1 \frac{i_{AB}(j) - i_{AB}(j-1)}{T_s}|}{\sum_{j=2}^{M/T_s} |u_{AB}(j)|} \quad (13)$$

其中, $u_{AB}(j)$ 和 $i_{AB}(j)$ 分别为故障相的线电压和相电流差。

式(12)、式(13)中,分子表示在 M/T_s 个采样点中,由时域方程模型产生的不平衡量;分母为故障全量信息,由原时域方程中的基频分量、非周期分量以及风电系统电力电子器件产生的谐波分量组成,同

时还包含长线路分布电容产生的高频分量。由于基波分量、非周期分量和谐波分量都满足时域方程,所以时域模型误差的大小只与线路的分布电容产生的高频分量有关。

求解式(12)、(13)得到 E ,代入式(10)对 X'_1 进行修正,得到修正后的 X'_1 如式(14)所示。

$$X_1 = X'_1 / (1 - E) \quad (14)$$

2.3 保护动作判据

通过对修正后的电抗值 X_1 进行求解,进一步得到故障点到保护安装处的距离,从而得到电阻值 R_{ad} ,并计算出保护安装处到故障点的阻抗值 Z_{ad} 。基于时域方程模型误差修正的距离保护动作判据为:

$$Z_{ad} < Z_{set} \quad (15)$$

通过对比修正后的阻抗和整定阻抗可知:当修正后的阻抗值小于整定值时,判定为区内故障,保护动作;否则判定为区外故障,保护不动作。

3 集群风电送出线距离保护性能验证

在新疆大学电力系统数字(DDRTS)和物理动态实时仿真模拟平台(南瑞继电保护装置)上搭建麻黄沟东双馈集群风电、淖毛湖直驱集群风电送出线实际案例数字仿真模块,将 PSCAD 软件仿真获得的双馈/直驱集群风电送出线发生金属性短路和经过渡电阻接地短路的故障数据同时传输给具有波形回放功能的 DDRTS 仿真环境和 MATLAB 环境中;并将 MATLAB 编程实现的距离保护算法与南瑞继电保护装置链接,通过数据传输与互相切换的方法,从 DDRTS 输出的数字仿真曲线和南瑞继电保护装置输出的物理动作状态观察入手,对不同的距离保护原理进行测试与验证。

3.1 双馈集群风电送出线的距离保护性能验证

3.1.1 双馈集群风电场简介及故障特征分析

麻黄沟东汇集站 220 kV 等级下的双馈集群风电网架结构见图 2,该汇集站下的双馈集群风电送出线电压等级为 220 kV,并且双馈机组在故障前处于欠同步状态($s=0.8$)。双馈集群汇集站的主变额定容

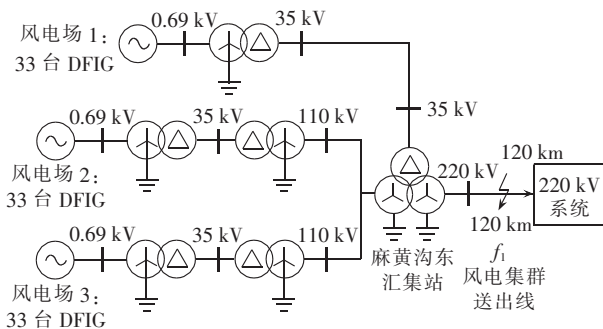


图 2 双馈集群风电汇集接入系统图

Fig.2 Cluster of DFIG farms connected to grid

量为 500 MV·A、额定电压为 38.5 kV/121 kV/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 120 km,单位正序线路电阻、电感、电容分别为 $0.052\ \Omega/\text{km}$ 、 $1.080\ \text{mH}/\text{km}$ 、 $0.013\ \mu\text{F}/\text{km}$,单位零序线路电阻、电感、电容分别为 $0.29\ \Omega/\text{km}$ 、 $2.7\ \text{mH}/\text{km}$ 、 $0.009\ \mu\text{F}/\text{km}$;常规电源的正、零序系统阻抗分别为 $2.41+\text{j}54.38\ \Omega$ 、 $1.2+\text{j}17.6\ \Omega$ 。

由 PSCAD 软件仿真获得并通过 MATLAB 软件转换的该地区 220 kV 双馈集群风电送出线距离保护 I 段发生区内单相金属性接地故障时的场侧电压、电流故障波形分别见图 3(a)和图 3(b)。MATLAB 对故障相电压、电流进行 FFT 得到的频率分布信息分别见图 3(c)和图 3(d)。由图 3 可知,故障相电流的主频率为 40 Hz,发生偏移;故障相电压主频率为 50 Hz,未发生偏移,且场侧电压含大量谐波。

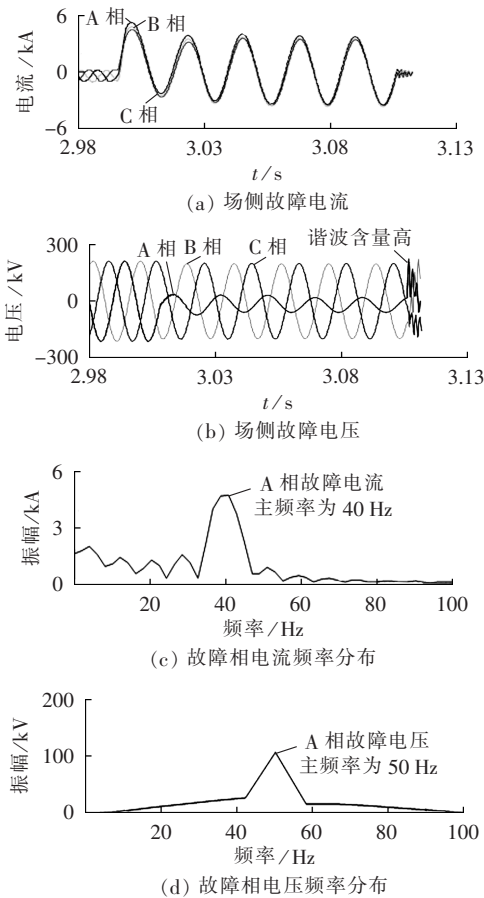


图 3 双馈集群风电场侧故障特征

Fig.3 Fault characteristics of DFIG wind farm cluster

3.1.2 双馈集群风电送出线发生相间短路故障时保护性能对比验证

对工频量距离保护、基于时域方程的时域距离保护、本文提出的时域方程模型误差修正距离保护在双馈集群风电送出线距离 I 段发生区内、区外 AB 相间故障时的保护性能进行测试验证。以 AB 相间阻抗继电器为例,考虑保护装置的检测规程对

距离 I 段的暂态超越有明确规定,即在故障量在距离保护 I 段整定值的 95 % 以内时保护可靠动作,在 I 段整定值的 105 % 以外时保护严格不动作。因此设定区内故障为距离保护 I 段范围的 95 % 处,区外故障为距离保护 I 段范围的 105 % 处。距离 I 段保护按照线路全长的 85% 进行整定,采样频率选取 4 000 Hz,选取故障后的 20 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的动作结果进行判定;若此时间段内,测量阻抗始终在整定阻抗圆内,则判定为区内故障;若测量阻抗始终落在整定阻抗圆外,则判定为区外故障;若测量阻抗在此时间段内不稳定,则视情况判定保护结果不稳定。

为探讨 3 种保护原理测量故障距离的精度,统一选取 0.04 s 内测量阻抗的平均值获得故障距离 x_1 ,定义测距偏差 $e=(x_1-l)/l$ (l 为实际故障距离)。

由于应用于 220 kV 及以下电压等级系统的电磁式电压互感器传变性能良好,在原理上不存在暂态超越现象。故仿真算例在考虑传变特性理想的情况下,定量分析因忽略分布电容参数影响而造成的时域方程模型误差 E 的变化情况,研究分析长距离送出线忽略分布电容参数影响的暂态超越问题。

a. 区内故障(距离 I 段保护范围的 95 % 处)。

距离 I 段保护范围 95 % 处发生区内故障时距离保护动作结果见图 4、表 1。由图 4、表 1 可知:工频量距离保护的测量阻抗轨迹在 40 ms 内从距离 I 段保护整定阻抗圆外到圆内又到圆外,保护动作结果不稳定,可能发生区内拒动,测距精度较低;时域距离保护和本文提出的误差修正距离保护的测量阻抗轨迹始终落在圆内,保护正确动作,且本文距离保护的测距精度较高。

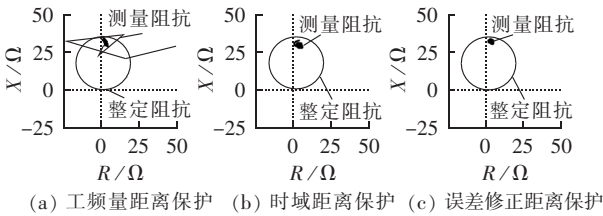


图 4 区内故障时 3 种保护原理保护动作结果

Fig.4 Operating results of three kinds of protection principle under internal fault protection

表 1 双馈集群风电距离 I 段区内保护动作结果

Table 1 Operating results of distance protection zone I of DFIG wind power cluster under internal fault

保护类型	测量阻抗特征	保护动作结果	$e/\%$	$E/\%$
工频量	圆外-圆内-圆外	不稳定	5.85	—
时域	圆内	动作	-3.13	—
误差修正	圆内	动作	2.02	5.11

b. 区外故障(距离 I 段保护范围的 105 % 处)。

距离 I 段保护范围 105 % 处发生区外故障时距

离保护动作结果见图 5 和表 2。由图 5、表 2 可知：工频量距离保护测量阻抗轨迹在 40 ms 内从距离 I 段保护整定阻抗圆外到圆内又到圆外，保护动作结果不稳定；时域距离保护阻抗轨迹在圆周边界往复，保护动作结果不稳定，以上 2 种保护原理极易发生区外误动，即暂态超越现象，故障测距精度较低，且测距结果小于实际故障距离；本文提出的误差修正距离保护的测量阻抗轨迹始终落在圆外，保护准确不动作，并且测距精度较高。

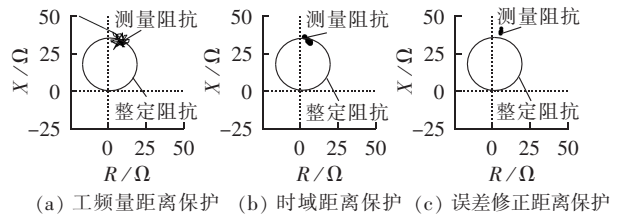


图 5 区外故障时 3 种保护原理保护动作结果
Fig.5 Operating results of three kinds of protection principle under external fault protection

表 2 双馈集群风电距离 I 段区外保护动作结果
Table 2 Operating results of distance protection zone I of DFIG wind power cluster under external fault

保护类型	测量阻抗特征	保护动作结果	$e / \%$	$E / \%$
工频量	圆外-圆内-圆外	不稳定	-6.85	—
时域	圆周边界往复	不稳定	-6.02	—
误差修正	圆外	不动作	2.63	8.39

3.1.3 双馈集群风电送出线发生单相经过渡电阻接地故障时保护性能对比验证

工况条件及保护动作判定情况同 3.1.1、3.1.2 节，利用在双馈集群风电送出线发生单相经过渡电阻接地故障时的实验数据，分别对 3 种保护原理的抗过渡电阻性能在送出线距离 I 段保护发生区内、区外故障时的保护性能进行测试验证。其中工频量距离保护因本身不具有抗过渡电阻能力，本文只采用双馈集群风电送出线发生单相经 10 Ω 过渡电阻接地故障时的实验数据；而时域距离保护及本文所提基于时域方程模型误差修正的距离保护由于从原理上考虑了过渡电阻影响，为验证其抗过渡电阻性能，采用双馈集群风电送出线发生单相经 100 Ω 过渡电阻接地故障时的实验数据。

a. 区内故障(距离 I 段保护范围的 95 %处)。

距离 I 段保护范围 95 % 处发生区内故障时距离保护动作结果见图 6 和表 3。由图 6、表 3 可知：工频量距离保护测量阻抗轨迹在 40 ms 内从距离 I 段整定阻抗圆外到圆内又到圆外，保护动作结果不稳定，可能发生保护拒动，抗过渡电阻性能较弱，故障测距精度较低；时域保护及本文提出的误差修正距离保护的测量阻抗轨迹始终落在圆内，抗过渡电阻性能较强，保护准确动作，且本文的误差修正距离保

护具有较高的测距精度。

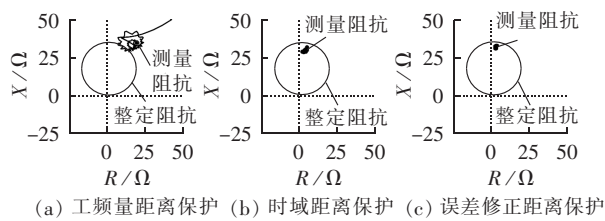


图 6 区内故障时 3 种保护原理保护动作结果
Fig.6 Operating results of three kinds of protection principle under internal fault protection

表 3 双馈集群风电距离 I 段区内保护动作结果
Table 3 Operating results of distance protection zone I of DFIG wind power cluster under internal fault

保护类型	测量阻抗特征	保护动作结果	$e / \%$	$E / \%$
工频量	圆外-圆内-圆外	不稳定	6.78	—
时域	圆内	动作	-3.09	—
误差修正	圆内	动作	1.98	4.97

b. 区外故障(距离 I 段保护范围的 105 %处)。

距离 I 段保护范围 105 % 处发生区外故障时距离保护动作结果见图 7 和表 4。由图 7、表 4 可知：工频量距离保护及本文提出的误差修正距离保护的测量阻抗轨迹在 40 ms 内始终落在圆外，保护不动作，但工频量距离保护测距精度较低；误差修正距离保护的测距结果近似等于实际故障距离，测距精度较高；时域距离保护阻抗轨迹在圆周边界往复，保护动作结果不稳定，极易发生区外误动，即暂态超越现象，并且故障测距精度较低，测距结果小于实际故障距离。

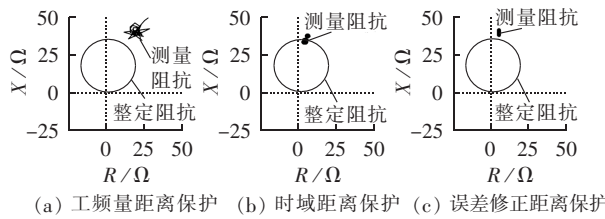


图 7 区外故障时 3 种保护原理保护动作结果
Fig.7 Operating results of three kinds of protection principle under external fault protection

表 4 双馈集群风电距离 I 段区外保护动作结果
Table 4 Operating results of distance protection zone I of DFIG wind power cluster under external fault

保护类型	测量阻抗特征	保护动作结果	$e / \%$	$E / \%$
工频量	圆外	不动作	7.95	—
时域	圆周边界往复	不稳定	-4.77	—
误差修正	圆外	不动作	2.26	6.86

综合 3.1.2 节和 3.1.3 节可知，当双馈集群风电送出线发生相间短路/单相接地短路故障时，通过比较发生区内、外故障对应的时域方程模型误差 E 的大小可见，随着故障距离的增大，分布电容参数影响

愈加显著,而基于时域方程模型的时域距离保护忽略分布电容参数影响,时域方程模型误差 E 随之增大,定量地说明了分布电容参数对基于时域方程模型的时域距离保护的影响。基于 FFT 算法的工频量距离保护因双馈风电侧电流频率偏移和含有大量高次谐波而造成保护在发生区内故障时拒动,并且抗过渡电阻能力较差,保护性能受到极大影响,而在发生区外故障时,保护动作结果不稳定。时域距离保护不受风电侧故障特性的影响,抗过渡电阻性能良好,在距离 I 段区内发生故障时,保护正确动作,但在发生区外故障时易发生保护误动现象,即暂态超越现象。本文提出的基于时域方程模型误差修正距离保护不受时域方程模型误差的影响,在发生区内、外故障时保护均能正确动作,并且测距精度较高,具有较强的抗过渡电阻性能。

3.2 直驱集群风电送出线的距离保护性能验证

3.2.1 直驱集群风电场简介及故障特征分析

淖毛湖汇集站 220 kV 电压等级下的直驱集群风电(网架结构见图 2,图中所有风电场的机型为直驱风机),该汇集站下的直驱集群风电送出线电压等级为 220 kV,并且直驱机组处于额定工作状态。直驱集群汇集站的主变额定容量为 600 MV·A、额定电压为 38.5 kV/121 kV/230 kV,其短路电压百分比 $U_{k12}=8\%$ 、 $U_{k23}=14\%$ 、 $U_{k13}=25\%$;直驱集群风电送出线长度为 120 km,单位正序线路电阻、电感、电容分别为 $0.052\ \Omega/\text{km}$ 、 $1.080\ \text{mH}/\text{km}$ 、 $0.013\ \mu\text{F}/\text{km}$,单位零序线路电阻、电感、电容分别为 $0.29\ \Omega/\text{km}$ 、 $2.7\ \text{mH}/\text{km}$ 、 $0.009\ \mu\text{F}/\text{km}$,常规电源的正、零序系统阻抗分别为 $2.41+\text{j}54.38\ \Omega$ 、 $1.2+\text{j}17.6\ \Omega$ 。

由 PSCAD 软件仿真获得并通过 MATLAB 软件转换的该地区 220 kV 直驱集群风电场送出线距离 I 段发生区内单相金属性接地故障时的场侧电压、电流故障波形分别见图 8(a)、8(b)。MATLAB 对故障相电压、电流进行 FFT 得到的频率分布信息分别见图 8(c)、8(d)。由此可知,故障相电压、电流主频率为 50 Hz,均未发生偏移,且场侧电压含少量谐波。

3.2.2 直驱集群风电送出线发生相间短路故障时保护性能对比验证

以 3.2.1 节中的直驱集群风电送出线为背景,以发生 AB 相间短路故障时的实验数据为例,对工频量距离保护、时域距离保护以及本文所提的基于时域方程模型误差修正的距离保护在送出线距离 I 段发生区内、区外故障时的保护性能进行测试验证。数据处理过程及保护判定过程同 3.1.2 节。

a. 区内故障(距离 I 段保护范围 95 % 处)。

距离 I 段保护范围 95 % 处发生区内故障时距离保护动作结果见图 9、表 5。由图 9、表 5 可知:3

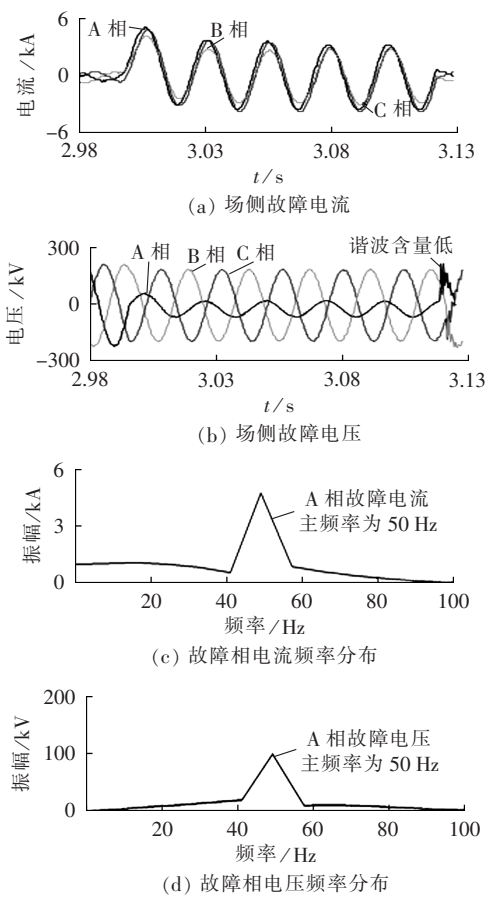


图 8 直驱集群风电场侧电压、电流

Fig.8 Voltages and currents of PMSG wind farm cluster

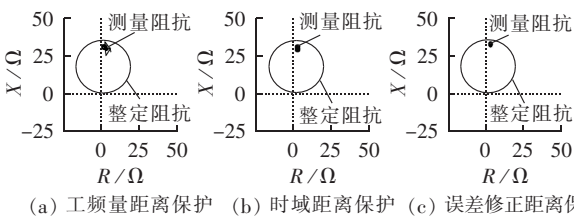


图 9 区内故障时 3 种保护原理保护动作结果

Fig.9 Operating results of three kinds of protection principle under internal fault

表 5 直驱集群风电距离 I 段区内保护动作结果

Table 5 Operating results of distance protection zone I of PMSG wind power cluster under internal fault

保护类型	测量阻抗特征	保护动作结果	$e/\%$	$E/\%$
工频量	圆内	动作	-4.64	—
时域	圆内	动作	-3.73	—
误差修正	圆内	动作	2.05	5.67

种距离保护的测量阻抗轨迹在 40 ms 内始终落在圆内,保护正确动作,其中本文所提误差修正距离保护原理具有较高的测距精度。

b. 区外故障(距离 I 段保护范围 105 % 处)。

距离 I 段保护范围 105 % 处发生区外故障时距离保护动作结果见图 10、表 6。由图 10、表 6 可知:工频量距离保护及本文提出的修正误差距离保护的

测量阻抗轨迹在 40 ms 内始终落在圆外,保护不动作,但工频量距离保护的测距精度较差;时域距离保护的测量阻抗轨迹在圆周边界往复,保护动作结果不稳定,极易发生区外误动,即暂态超越现象,且其故障测距精度较低,测距结果小于实际故障距离。

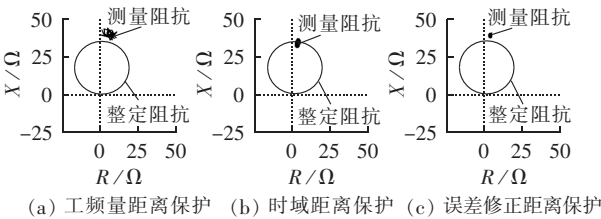


图 10 区外故障时 3 种保护原理保护动作结果

Fig.10 Operating results of three kinds of protection principle under external fault protection

表 6 直驱集群风电距离 I 段区外保护动作结果

Table 6 Operating results of distance protection zone I of PMSG wind power cluster under external fault

保护类型	测量阻抗特征	保护动作结果	$e / \%$	$E / \%$
工频量	圆外	不动作	5.64	—
时域	圆周边界往复	不稳定	-5.52	—
误差修正	圆外	不动作	2.53	7.57

3.2.3 直驱集群风电送出线发生单相经过渡电阻接地故障时保护性能对比验证

数据处理过程及保护动作判定情况同 3.1.2 节, 分别对 3 种保护原理在直驱集群风电送出线发生区内、外单相经过渡电阻接地故障时进行测试及验证, 过渡电阻情况同 3.1.3 节。

a. 区内故障(距离 I 段保护范围 95 % 处)。

距离 I 段保护范围 95 % 处发生区内故障时距离保护动作结果见图 11、表 7。由图 11、表 7 可知: 工频量距离保护测量阻抗轨迹在 40 ms 内从距离 I 段整定阻抗圆外到圆内又到圆外, 保护动作结果不

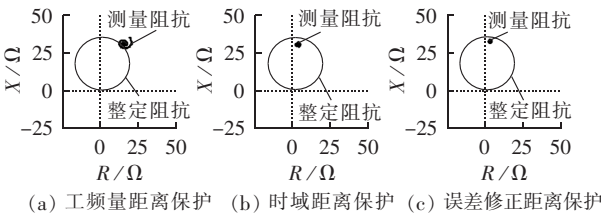


图 11 区内故障时 3 种保护原理保护动作结果

Fig.11 Operating results of three kinds of protection principle under internal fault

表 7 直驱集群风电距离 I 段区内保护动作结果

Table 7 Operating results of distance protection zone I of PMSG wind power cluster under internal fault

保护类型	测量阻抗特征	保护动作结果	$e / \%$	$E / \%$
工频量	圆外-圆内-圆外	不稳定	7.36	—
时域	圆内	动作	-3.44	—
误差修正	圆内	动作	1.97	5.30

稳定,可能发生拒动,易受过渡电阻的影响,测距精度较低;时域保护及本文提出的误差修正距离保护的测量阻抗轨迹始终落在圆内,抗过渡电阻能力较强,保护准确动作,且误差修正距离保护测距精度较高。

b. 区外故障(距离 I 段保护范围 105 % 处)。

距离 I 段保护范围 105 % 处发生区外故障时距离保护动作结果见图 12、表 8。由图 12、表 8 可知: 工频量距离保护及本文提出的误差修正距离保护的测量阻抗轨迹在 40 ms 内始终落在圆外,保护恒定不动作,但工频量距离保护的测距精度较差,并且抗过渡电阻能力较弱,误差修正距离保护的测距精度较高,抗过渡电阻能力较强;时域距离保护的测量阻抗轨迹在圆周边界往复,保护动作结果不稳定,极易发生误动,即暂态超越现象,并且故障测距精度较低,测距结果小于实际故障距离。

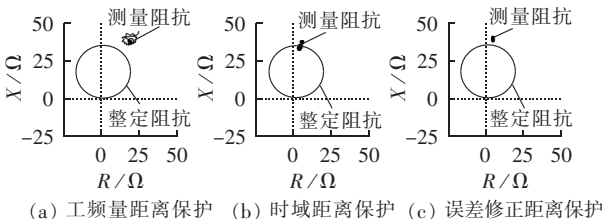


图 12 区外故障时 3 种保护原理保护动作结果

Fig.12 Operating results of three kinds of protection principle under external fault protection

表 8 直驱集群风电距离 I 段区外保护动作结果

Table 8 Operating results of distance protection zone I of PMSG wind power cluster under external fault

保护类型	测量阻抗特征	保护动作结果	$e / \%$	$E / \%$
工频量	圆外	不动作	8.37	—
时域	圆周边界往复	不稳定	-4.97	—
误差修正	圆外	不动作	2.19	7.03

结合 3.2.2 节和 3.2.3 节可知,当直驱集群风电送出线发生相间短路/单相接地短路故障时,通过比较发生区、内外故障时对应的时域方程模型误差 E 的大小可见:随着故障距离的增大,分布电容参数影响愈加显著,而基于时域方程模型的时域距离保护忽略分布电容参数影响,时域方程模型误差 E 随之增大,定量说明了分布电容参数对基于时域方程模型的时域距离保护的影响;基于 FFT 的工频量距离保护原理因直驱风电侧电流频率未偏移及高次谐波含量较少,保护在区内外均能正确动作,但抗过渡电阻性能较差,在发生区内故障时,极易造成保护拒动现象;时域距离保护原理抗过渡电阻性能良好,在距离保护 I 段区内发生故障时,保护能够正确动作,但在区外发生故障时,易发生暂态超越现象;本文提出的新型保护原理,克服时域距离保护易受长线路时域方程模型误差的影响,在区、内外发生故障时保护均能正确动作,测距精度较高,抗过渡电阻性能良好。

3.3 集群风电送出线 3 种保护原理的抗过渡电阻性能对比

双馈集群风电工况及数据处理过程同 3.1.1、3.1.3 节,直驱集群风电工况及数据处理过程同 3.2.1、3.2.3 节,对 3 种保护原理在双馈/直驱集群风电送出线距离 I 段 95 %、105 % 处发生单相经 0、25 Ω、50 Ω、75 Ω、100 Ω、125 Ω、150 Ω 过渡电阻的接地故障进行仿真验证,3 种保护原理的动作结果如表 9、10 所示,若保护正确动作,则记为“1”;若保护不动作,则记为“-1”;若保护动作结果不稳定,则记为“0”。

表 9 双馈集群风电距离 I 段保护动作结果
Table 9 Operating results of distance protection zone I of DFIG wind power cluster

过渡电阻/Ω	保护动作结果		
	工频量	时域	误差修正
0	区内(0),区外(0)	区内(1),区外(0)	区内(1),区外(-1)
25	区内(-1),区外(-1)	区内(1),区外(0)	区内(1),区外(-1)
50	区内(-1),区外(-1)	区内(1),区外(0)	区内(1),区外(-1)
75	区内(-1),区外(-1)	区内(1),区外(0)	区内(1),区外(-1)
100	区内(-1),区外(-1)	区内(1),区外(0)	区内(1),区外(-1)
125	区内(-1),区外(-1)	区内(1),区外(0)	区内(1),区外(-1)
150	区内(-1),区外(-1)	区内(1),区外(0)	区内(1),区外(-1)

表 10 直驱集群风电距离 I 段保护动作结果
Table 10 Operating results of distance protection zone I of PMSG wind power cluster

过渡电阻/Ω	保护动作结果		
	工频量	时域	误差修正
0	区内(1),区外(-1)	区内(1),区外(0)	区内(1),区外(-1)
25	区内(-1),区外(-1)	区内(1),区外(0)	区内(1),区外(-1)
50	区内(-1),区外(-1)	区内(1),区外(0)	区内(1),区外(-1)
75	区内(-1),区外(-1)	区内(1),区外(0)	区内(1),区外(-1)
100	区内(-1),区外(-1)	区内(1),区外(0)	区内(1),区外(-1)
125	区内(-1),区外(-1)	区内(1),区外(0)	区内(1),区外(-1)
150	区内(-1),区外(-1)	区内(1),区外(0)	区内(1),区外(-1)

由表 9、10 可知,无论是双馈风电系统还是直驱风电系统,基于工频量原理的距离保护在集群风电送出线距离保护 I 段区内发生故障时,抗过渡电阻能力较弱,极易发生拒动现象,保护能力受到极大影响。

基于集中参数时域方程的时域距离保护原理抗过渡电阻性能较高,在双馈/直驱集群风电送出线区内发生故障时,保护能够正确动作,但因忽略了送出线分布电容参数的影响,当故障发生在送出线距离保护 I 段区外时,极易造成保护出现误动现象,保护性能受到影响。

基于时域方程模型误差修正的时域距离保护原理,抗过渡电阻性能良好,并且考虑了长距离送出线分布电容的影响,在双馈/直驱集群风电送出线距离保护 I 段发生区外故障时,保护仍能正确动作。

4 结论

通过基于双馈、直驱集群风电送出线的距离保

护动作情况的分析可得以下结论。

a. 大规模双馈集群风电接入电网将带来的谐波含量高、电流频率偏移特性使传统工频量距离保护无论在双馈集群风电送出线区内发生金属性接地故障还是经过渡电阻接地故障时均存在不正确动作的风险,并且抗过渡电阻能力较弱。

b. 无论风电机型为双馈还是直驱,原有时域距离保护原理随着故障距离的增大,分布电容参数影响显著,而基于时域方程模型的时域距离保护忽略分布电容参数影响,时域方程模型的误差 E 也在随之增大。在集群风电长距离送出线区外故障时,保护极易发生误动,即暂态超越现象。故障测距精度较低,但具有较强的抗过渡电阻能力。

c. 本文提出的基于时域方程模型误差修正的距离保护,利用时域模型误差与测量电抗的关系修正测量电抗值,不受集群风电送出线距离长短、风电机型和过渡电阻的影响,均能有效保证不同发生区内故障时正确动作,发生区外故障时有效防止距离保护 I 段暂态超越现象,并且测距精度较高,优于传统工频及原有时域方程距离保护。

参考文献:

[1] 孙丽玲,房丹. 定子匝间故障的双馈风力发电机组的建模与低电压穿越分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):82-87.
SUN Liling,FANG Dan. Modeling and low-voltage ride-through analysis for DFIG with SWITSC[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11):82-87.

[2] 许伯强,张舒怡. 定子故障下的双馈风力发电机组建模与稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):93-99.
XU Boqiang,ZHANG Shuyi. Modeling and stability analysis of DFIG with stator fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(9):93-99.

[3] 王婷,李凤婷,王宾,等. 风电场送出线非全相运行潜供特性[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):169-174.
WANG Ting,LI Fengting,WANG Bin,et al. Features of secondary arc current during incomplete-phase operation of wind farm outgoing lines[J]. Electric Power Automation Equipment,2016, 36(2):169-174.

[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] 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.

[6] 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.
- [7] 卜强生, 高磊, 何世恩, 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]. 电网技术, 2015, 43(8): 21-27.
- BU Qiangsheng, GAO Lei, HE Shien, 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 Technology, 2015, 43(8): 21-27.
- [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. 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.
- [9] 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.
- [10] 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(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.
- [11] 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. 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.
- [12] 宋国兵, 刘林林, 索南加乐, 等. 基于参数识别的时域长线距离保护[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 67-70, 81.
- SONG Guobing, LIU Linlin, SUONAN Jiale, et al. Long transmission line distance protection based on parameter identification in time domain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 67-70, 81.
- [13] 索南加乐, 谢静, 刘东, 等. 克服距离保护暂态超越的新方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 52-57.
- SUONAN Jiale, XIE Jing, LIU Dong, et al. Novel algorithm for overcoming the transient overreach of distance protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 52-57.

作者简介:



樊艳芳

樊艳芳(1971—),女,新疆乌鲁木齐人,副教授,通信作者,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);

侯俊杰(1993—),男,新疆乌鲁木齐人,硕士研究生,从事可再生能源并网技术与电力系统继电保护方面的研究(E-mail: 826686025@qq.com);

晁勤(1959—),女,湖南宁乡人,教授,博士研究生导师,从事新能源发电系统并网技术及其保护控制方面的研究。

Time-domain equation model deviation correction distance protection for cluster wind power transmission line with anti-transient ability

FAN Yanfang, HOU Junjie, CHAO Qin, WANG Yibo

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

Abstract: Conventional power frequency distance protections have adaptability problems due to the high harmonics, frequency deviation and weak feedback in doubly-fed wind power system. Distance protection based on time domain in short distance wind power outgoing lines has a better adaptability, but in long distance wind power outgoing lines, the influence of distributed capacitance is prone to transient transcendence of distance protection zone I. A distance protection scheme that can reduce the influence of transient transcendence by correcting cluster wind power outgoing line model is proposed. From the point of adaptability of long distance wind power outgoing line, the error of time-domain equation model based on lumped parameter circuit model is analyzed, a correction method based on the error of time-domain equation model for time domain distance protection reactance measurement is proposed, and with the consideration of the impact of transition resistance parameters, an operation criterion adapted to long distance outgoing lines of the cluster wind power is established. Through experimental data of a Xinjiang area cluster of DFIG/D-PMSG wind power outgoing line when the fault happens, the proposed time-domain equation model corrected distance protection is tested, the results verify that it can well adapt to different kinds of cluster wind power outgoing lines, avoid transient transcendence when faults occur out of the protection zone I, and the ability of the proposed protection against transition resistance is good.

Key words: wind power; wind farm cluster; outgoing line; distance protection; time-domain equation; model error