

DOI:10.12158/j.2096-3203.2023.03.028

# 适用于新能源并网系统的距离保护方法

桂小智<sup>1</sup>, 宋国兵<sup>2</sup>, 常鹏<sup>2</sup>, 常仲学<sup>2</sup>

(1. 国网江西省电力有限公司科学研究院, 江西 南昌 330096;

2. 电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西 西安 710049)

**摘要:**为进一步提升距离保护在新能源并网系统中的性能,提出一种综合考虑并网换流器控制策略和传输线分布电容效应的距离保护方法。当系统发生不对称故障时,结合换流器的控制特性、系统的序阻抗特征和过渡电阻的纯阻性特征,消除故障回路方程中过渡电阻和对端系统参数等3个未知量,进而实现R-L模型中对故障距离的求解。随后基于R-L模型中的计算结果设置整定点,并利用Bergeron模型中的计算公式推导整定点处的真实电气量。最后联列整定点至故障点的故障回路方程求解故障距离,以减弱分布电容效应对距离保护的影响。仿真结果验证了该方法受换流器故障特征和过渡电阻影响小,在长线中仍具有较好的性能。

**关键词:**新能源并网系统;距离保护;自适应整定;电流平衡控制;分布参数模型;故障穿越

中图分类号:TM773

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)03-0250-08

## 0 引言

对于单端量距离保护而言,由于过渡电阻和对端系统助增效应的影响,线路发生非金属性故障时保护安装处列写的2个故障回路方程(实部和虚部)中将含有4个未知量,未知量多于方程数导致故障距离无法求解。而在新能源并网系统中,电力电子装置的弱馈特征和功角受控特征又进一步恶化了传统距离保护的性能<sup>[1]</sup>。上述问题得到了国内外学者的广泛关注<sup>[2-8]</sup>。

为了提高单端量距离保护的性能,文献[9-10]提出一种基于时域的距离保护算法,利用暂态时域信号的不相关特性,联列多个暂态时域方程使方程数满足定解条件,进而实现对故障距离的求解。文献[11]则将故障点至对端终端的零序阻抗等效为一个纯电感,在该假设的基础上求解含有3个未知量的线性测距方程以实现故障距离的求解。文献[12]针对传统距离保护抗过渡电阻能力差的问题,结合保护安装处负序电流和故障点处电流的相位关系,减小了过渡电阻对距离保护的影响,提高了保护的性能。基于相似的思路,文献[13-14]利用对电网序阻抗的假设,减少了故障回路方程中的未知量数目,为故障距离的计算创造了条件。文献[15]则针对自适应距离保护方案区外故障时可能误动的问题,引入线路短路阻抗以构成保护辅助判据,改善了自适应距离保护的性能。而基于控制与保护融合的思路,文献[16-17]改变并网换流器的控制策略,使得本端和对端母线处的序电流相位保持

一致,进而消除方程中过渡电阻和对端系统阻抗等未知量,实现对故障距离的求解。文献[18]则利用换流器向电网注入高频谐波信号,利用传输线和常规系统电抗随系统频率上升而增大的特性削弱过渡电阻对故障距离计算的影响,提高距离保护的可靠性。上述方法均从原理上克服了过渡电阻等因素对距离保护的影响,但基于阻抗假设的方法仍受线路模型的影响,而基于控保融合的方法所要求的控制策略较为复杂,仍存在改进空间。

为了进一步提升距离保护的性能,文中提出一种综合考虑新能源并网换流器控制策略和传输线分布电容效应的距离保护方法。首先分析研究了换流器系统的故障控制策略以及系统发生故障时换流器系统的输出特性。然后,针对不对称故障,结合换流器的输出特性、电网的阻抗特征和过渡电阻的纯阻性特征,推导了R-L模型中故障距离的求解方法。接着,为了进一步提高保护性能,基于R-L模型中的计算结果设置整定点,并利用Bergeron模型中的沿线电气量计算公式计算了整定点处的真实电气量。最后,联列整定点至故障点的故障回路方程求解两者之间的故障距离。PSCAD软件的仿真结果验证了该方法受过渡电阻、对端系统助增效应和传输线分布电容效应影响小,对故障距离的计算结果具有很高的准确度,可以应用于新能源并网系统。

## 1 新能源并网换流站故障特征分析

### 1.1 故障穿越控制策略

对于新能源并网系统,当系统发生故障时,并网逆变器往往切换至低电压穿越(low voltage ride

收稿日期:2022-11-23;修回日期:2023-02-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52107123)

through, LVRT) 控制策略向电网提供无功支撑。当系统发生不对称故障时,换流器通常切换至图 1 所示的 LVRT 控制策略<sup>[19]</sup>,可以实现正负序分离。

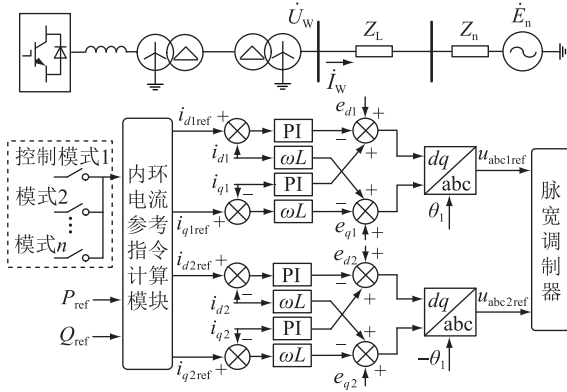


图 1 LVRT 控制策略

Fig.1 The LVRT control strategy

图 1 中,  $\dot{E}_n$ 、 $Z_n$  分别为同步机的等效电动势和系统阻抗;  $Z_L$  为线路阻抗;  $\dot{U}_W$ 、 $\dot{I}_W$  分别为换流器母线侧的电压和电流;  $P_{ref}$ 、 $Q_{ref}$  分别为有功和无功功率参考指令;  $i_{d1ref}$ 、 $i_{q1ref}$ 、 $i_{d2ref}$ 、 $i_{q2ref}$  分别为电流  $d$ 、 $q$  轴的正、负序参考指令(下标“1”表示正序,下标“2”表示负序);  $i_{d1}$ 、 $i_{q1}$ 、 $i_{d2}$ 、 $i_{q2}$ 、 $e_{d1}$ 、 $e_{q1}$ 、 $e_{d2}$ 、 $e_{q2}$  分别为换流站公共点处的电流和电压的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $\theta_1$  为正序电压相位;  $\omega$  为系统基频角速度;  $L$  为换流器出口侧的滤波电感;  $u_{abc1ref}$ 、 $u_{abc2ref}$  分别为正序和负序电压参考指令。

## 1.2 换流器输出特性分析

负序电流抑制控制作为最常见的不对称故障控制策略之一,可控制并网逆变器输出三相平衡电流以改进电流质量,被国内外学者广泛研究<sup>[20-21]</sup>。文中的研究也基于该控制策略,式(1)展示了其对应的电流控制指令:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i_{d1ref} \\ i_{q1ref} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} e_{d1} & e_{q1} \\ e_{q1} & -e_{d1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \end{bmatrix} \\ i_{d2ref} = i_{q2ref} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知,负序电流抑制策略下换流器侧负序电流为 0,因此所研究系统的负序等效网络换流器侧可以等效为开路,如图 2 所示。其中  $\dot{U}_{W2}$ 、 $\dot{I}_{W2}$  分别为保护安装处的负序电压和电流;  $\dot{U}_{F2}$ 、 $\dot{I}_{F2}$  分别为故障点处的负序电压和电流;  $\dot{U}_{n2}$ 、 $\dot{I}_{n2}$  分别为对端母线处负序电压和电流;  $R_F$  为过渡电阻。

与此同时,由于换流站的等值零序阻抗仅由变压器的接地方式决定,因此当线路发生不对称接地故障时,系统的零序网络如图 3 所示。其中  $\dot{U}_{W0}$ 、

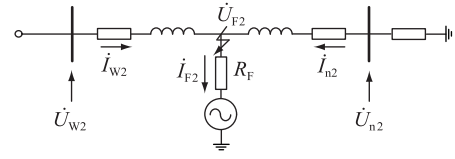


图 2 电流平衡控制时系统的负序网络

Fig.2 The equivalent negative-sequence network of the system under current balanced control

$\dot{U}_{W0}$  分别为保护安装处的零序电压和电流;  $\dot{U}_{F0}$ 、 $\dot{I}_{F0}$  分别为故障点处的零序电压和电流。

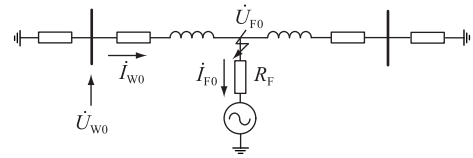


图 3 系统等值零序网络

Fig.3 The equivalent zero-sequence network of the system

基于图 1—图 3 所示的电路拓扑,第 2 章研究了适用于新能源并网系统的距离保护方法。

## 2 距离保护方法

### 2.1 相间故障

#### 2.1.1 计及新能源并网换流器控制策略的距离保护

当系统发生 BC 两相(简称 BC)故障时,由图 2 可知  $\dot{U}_{W2}$  和  $\dot{U}_{F2}$  的关系可表示为:

$$\dot{U}_{W2} = \dot{U}_{F2} = -\dot{I}_{F2} [(1-d)Z_{l2} + Z_{n2}] \quad (2)$$

式中:  $d$  为换流器侧保护安装处至故障点的故障距离;  $Z_{n2}$ 、 $Z_{l2}$  分别为对端系统和传输线单位长度的负序阻抗。

依据 BC 故障的电路拓扑和故障点处的边界条件,其故障回路方程可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{U}_{Wbc} - dZ_{l1}\dot{I}_{Wbc} = (\alpha - \alpha^2)\dot{I}_{F2}R_F \\ \dot{U}_{Wbc} = \dot{U}_{Wb} - \dot{U}_{Wc} \\ \dot{I}_{Wbc} = \dot{I}_{Wb} - \dot{I}_{Wc} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\dot{U}_{Wb}$ 、 $\dot{U}_{Wc}$ 、 $\dot{I}_{Wb}$ 、 $\dot{I}_{Wc}$  分别为场站侧对应相的电压和电流;  $Z_{l1}$  为传输线单位长度的正序阻抗;  $\dot{U}_{Wbc}$ 、 $\dot{I}_{Wbc}$  分别为 B 相和 C 相的电压差和电流差;  $\alpha = e^{-j120^\circ}$ 。将式(2)代入式(3)以消去  $\dot{I}_{F2}$ ,可得:

$$\dot{U}_{Wbc} - dZ_{l1}\dot{I}_{Wbc} = \frac{(\alpha^2 - \alpha)\dot{U}_{W2}R_F}{(1-d)Z_{l2} + Z_{n2}} \quad (4)$$

式(4)中,由于传输线等效负序阻抗的相位和同步机等效负序阻抗的相位近似相等,因此式(4)

的相位可以用式(5)估算:

$$\arg\left(\frac{(\alpha^2 - \alpha)\dot{U}_{W2}R_F}{(1-d)Z_{l2} + Z_{n2}}\right) \approx \arg\left(\frac{(\alpha^2 - \alpha)\dot{U}_{W2}}{Z_{l2}}\right) \quad (5)$$

由式(5)可知,故障回路方程的相位可以近似为不受过渡电阻和对端系统参数影响的已知量,因此通过对式(4)两侧的相位取正切变换即可消除方程中的过渡电阻和对端系统电气量,并建立如式(6)所示的方程,此时方程中仅含有未知量  $d$ 。

$$\tan\left(\arg\left(\frac{\dot{U}_{Wbc}}{\dot{I}_{Wbc}} - dZ_{l1}\right)\right) = \tan\left(\arg\left(\frac{(\alpha^2 - \alpha)\dot{U}_{W2}}{Z_{l2}\dot{I}_{Wbc}}\right)\right) \quad (6)$$

定义 BC 故障相的测量阻抗  $Z_{BC} = \dot{U}_{Wbc}/\dot{I}_{Wbc}$ ,  $\varphi_1 = \arg((\alpha^2 - \alpha)\dot{U}_{W2}/(Z_{l2}\dot{I}_{Wbc}))$ , 可以将式(6)进一步化简为式(7)。

$$\tan(\arg(Z_{BC} - dZ_{l1})) = \tan(\varphi_1) \quad (7)$$

结合  $\tan$  的定义,  $\tan(\arg(Z_{BC} - dZ_{l1}))$  的值应为  $Z_{BC} - dZ_{l1}$  在纵轴上的投影和在横轴上的投影之比。将该向量展开可知其在纵联和横轴上的投影分别为  $|Z_{BC}|\sin(\varphi_{BC}) - d|Z_{l1}|\sin(\varphi_{l1})$  和  $|Z_{BC}|\cos(\varphi_{BC}) - d|Z_{l1}|\cos(\varphi_{l1})$ , 其中  $|Z_{BC}|$ 、 $\varphi_{BC}$  分别为  $Z_{BC}$  的幅值和相位;  $|Z_{l1}|$ 、 $\varphi_{l1}$  分别为  $Z_{l1}$  的幅值和相位。基于上述分析,式(7)可表示为:

$$\frac{|Z_{BC}|\sin(\varphi_{BC}) - d|Z_{l1}|\sin(\varphi_{l1})}{|Z_{BC}|\cos(\varphi_{BC}) - d|Z_{l1}|\cos(\varphi_{l1})} = \tan(\varphi_1) \quad (8)$$

求解式(8),可得:

$$d = \frac{\tan(\varphi_1)|Z_{BC}|\cos(\varphi_{BC}) - |Z_{BC}|\sin(\varphi_{BC})}{\tan(\varphi_1)|Z_{l1}|\cos(\varphi_{l1}) - |Z_{l1}|\sin(\varphi_{l1})} \quad (9)$$

### 2.1.2 计及分布参数效应的改进方法

基于上述推导可知 2.1.1 节方法基于 R-L 模型,因此长线中受分布参数效应的影响。文中提出距离保护在长线中的改进方法,具体步骤如下:

(1) 对于 BC 故障,首先基于式(9)中的计算结果,自适应设置整定点为:

$$d_{set} = 0.8d \quad (10)$$

由于 2.1.1 节所示方法具有较高精度,认为通过式(10)得到的  $d_{set}$  位于实际故障点前,此时整定点和故障点  $F$  的位置关系如图 4 所示。

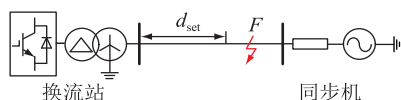


图 4 整定点示意

Fig.4 Schematic diagram of the setting point

(2) 随后,依据 Bergeron 模型中沿线电气量分布公式,计算  $d_{set}$  处的真实电气量:

$$\begin{cases} \dot{U}_{dset\_bc} = \dot{U}_{Wbc} \cosh(\gamma_1 d_{set}) - \dot{I}_{Wbc} Z_C \sinh(\gamma_1 d_{set}) \\ \dot{I}_{dset\_bc} = -\dot{U}_{Wbc} \sinh(\gamma_1 d_{set})/Z_C + \dot{I}_{Wbc} \cosh(\gamma_1 d_{set}) \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\gamma_1$  为正序传播系数;  $Z_C$  为波阻抗;  $\dot{U}_{dset\_bc}$ 、 $\dot{I}_{dset\_bc}$  分别为整定点处的 B 相和 C 相电压、电流差值。

(3) 基于  $d_{set}$  处的电气量,构建和式(3)相似的  $d_{set}$  至故障点的故障回路方程,并运用式(9)再次计算故障距离  $d_1$ ,最终和  $d_{set}$  求和得到修正后的故障距离  $d_{re}$ 。

$$d_{re} = d_{set} + d_1 \quad (12)$$

## 2.2 单相接地故障

线路发生 A 相接地(简称 AG)故障时换流站母线侧的故障回路方程可推导为:

$$\dot{U}_{wa} - dZ_{l1}(\dot{I}_{wa} + K_{(0)}\dot{I}_{w0}) = 3\dot{I}_{F0}R_F \quad (13)$$

式中:  $\dot{U}_{wa}$ 、 $\dot{I}_{wa}$  分别为换流站侧 A 相电压、电流;  $K_{(0)}$  为零序电流补偿系数。

在图 3 所示的零序阻抗网络中,考虑到变压器、传输线和同步机等电力元件的零序阻抗相位近似相等,因此式(13)的相位可以近似为:

$$\arg(\dot{I}_{F0}R_F) \approx \arg(\dot{I}_{w0}R_F) \quad (14)$$

和 2.1.1 节中的 BC 故障同理,首先对式(13)两侧的相位取正切变换,再将式(14)代入,便可消除方程中的过渡电阻和对端系统参数,从而为  $d$  的求解创造良好的条件。记 A 相测量阻抗  $Z_{AG}$  为  $\dot{U}_{wa}/(\dot{I}_{wa} + K_{(0)}\dot{I}_{w0})$ ,  $\varphi_2 = \arg(\dot{I}_{F0}/(\dot{I}_{wa} + K_{(0)}\dot{I}_{w0}))$ , 依据和 BC 故障相似的方法,可以推得  $d$  的表达式为:

$$d = \frac{\tan(\varphi_2)|Z_{AG}|\cos(\varphi_{AG}) - |Z_{AG}|\sin(\varphi_{AG})}{\tan(\varphi_2)|Z_{l1}|\cos(\varphi_{l1}) - |Z_{l1}|\sin(\varphi_{l1})} \quad (15)$$

式中:  $|Z_{AG}|$ 、 $\varphi_{AG}$  分别为  $Z_{AG}$  的幅值和相位。

同理对于 AG 故障,可以依据式(15)的结果计算得到  $d_{set}$ ,并运用沿线电气量公式计算  $d_{set}$  处的电气量,联列  $d_{set}$  至故障点的故障回路方程求解故障距离,以改进上述距离保护方法在长线中的性能。其具体步骤同 2.1.2 节,文中不再赘述。

## 2.3 相间接地故障

以 BC 两相接地(简称 BCG)故障为例进行分析,该故障下换流站保护安装处对应的故障回路方程可表示为:

$$\dot{U}_{wb} + \dot{U}_{wc} + dZ_{l1}(\dot{I}_{wb} + \dot{I}_{wc} + 2K_{(0)}\dot{I}_{w0}) = (6R_F + 3R_{ph})\dot{I}_{F0} \quad (16)$$

式中: $R_{ph}$ 为相间过渡电阻。

针对式(16),首先将其转化为式(17),记BCG故障的测量阻抗 $Z_{BCG}$ 为 $(\dot{U}_{wb} + \dot{U}_{wc})/(\dot{I}_{wb} + \dot{I}_{wc} + 2K_{(0)}\dot{I}_{w0})$ , $\varphi_3 = \arg(\dot{I}_{F0}/(\dot{I}_{wb} + \dot{I}_{wc} + 2K_{(0)}\dot{I}_{w0}))$ 。

$$\frac{\dot{U}_{wb} + \dot{U}_{wc}}{\dot{I}_{wb} + \dot{I}_{wc} + 2K_{(0)}\dot{I}_{w0}} - dZ_{l1} = \frac{\dot{I}_{F0}(6R_F + 3R_{ph})}{\dot{I}_{wb} + \dot{I}_{wc} + 2K_{(0)}\dot{I}_{w0}} \quad (17)$$

由于系统发生BCG故障时,式(14)仍然是近似成立的,因此在假设过渡电阻纯阻性的情况下,对式(17)两侧的相位取正切变换可得:

$$\frac{|Z_{BCG}|\cos(\varphi_{BCG}) - d|Z_{l1}|\cos(\varphi_{l1})}{|Z_{BCG}|\sin(\varphi_{BCG}) - d|Z_{l1}|\sin(\varphi_{l1})} = \tan(\varphi_3) \quad (18)$$

式中: $|Z_{BCG}|$ 、 $\varphi_{BCG}$ 分别为 $Z_{BCG}$ 的幅值和相位。由式(18)可以进一步推得 $d$ 的表达式为:

$$d = \frac{\tan(\varphi_3)|Z_{BCG}|\cos(\varphi_{BCG}) - |Z_{BCG}|\sin(\varphi_{BCG})}{\tan(\varphi_3)|Z_{l1}|\cos(\varphi_{l1}) - |Z_{l1}|\sin(\varphi_{l1})} \quad (19)$$

随后基于式(19)的结果,利用2.1.2节所示的方法对其进行修正,以提高距离保护在长线中的性能。

### 3 保护动作流程

文中所提距离保护动作流程为:

(1) 首先利用启动元件判别系统的运行状态,考虑到系统交流侧发生故障时母线电压会发生突变,因此设计了如式(20)所示的基于电压突变量 $\Delta\dot{U}_w$ 的启动判据,其中 $\lambda_{set}$ 为启动整定值。

$$\sum |\Delta\dot{U}_w| \geq \lambda_{set} \quad (20)$$

(2) 当启动判据判别结果显示系统发生故障后,利用适用于新能源并网系统的方向元件<sup>[22]</sup>和选相判据<sup>[23]</sup>判别故障方向和故障类型。

(3) 当换流站母线侧发生正方向故障时,针对不同的故障类型,利用所提方法计算故障距离,当计算结果位于方向圆特性阻抗继电器的动作区域内时,距离保护动作,否则保护不动作。

保护动作流程如图5所示。

### 4 仿真验证

为了验证文中方法,在PSCAD软件中搭建了图1拓扑的仿真模型。该模型由模块化多电平换流器

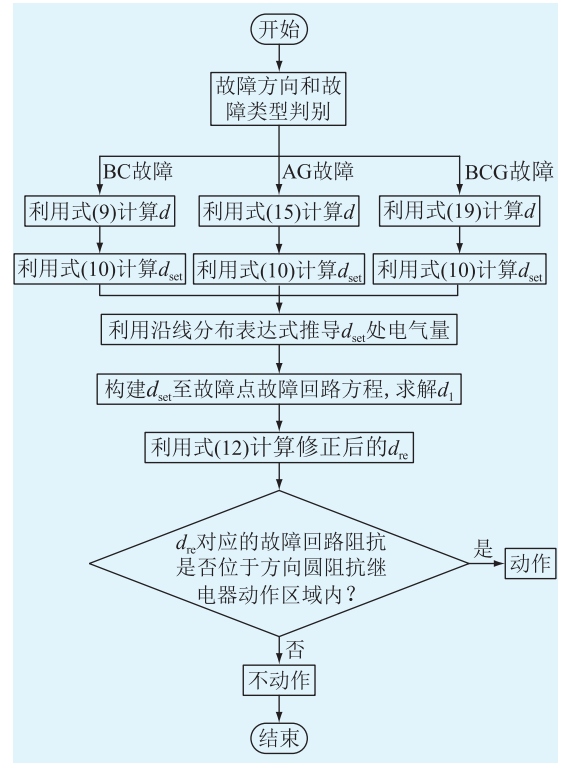


图5 所提距离保护动作流程

Fig.5 Action flowchart of the proposed distance protection

系统、传输线和同步机组成,表1展示了该模型的基本参数,其中 $R_{n1}$ 、 $L_{n1}$ 分别为常规系统的正序电阻和电感; $R_{n0}$ 、 $L_{n0}$ 分别为常规系统的零序电阻和电感; $r_1$ 、 $l_1$ 、 $c_1$ 、 $r_0$ 、 $l_0$ 、 $c_0$ 分别为传输线单位长度的正序和零序电阻、电感和电容。

表1 所研究系统的参数

Table 1 The parameters of the studied system

系统参数	数值	传输线参数	数值
额定电压/kV	500	$r_1/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.13
传输功率/MW	400	$l_1/(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	1.53
频率/Hz	50	$c_1/(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	0.006
$R_{n1}/\Omega$	4.23	$r_0/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.34
$L_{n1}/\text{H}$	0.049	$l_0/(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	4.10
$R_{n0}/\Omega$	3.51	$c_0/(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	0.004
$L_{n0}/\text{H}$	0.043	线路长度/km	250

#### 4.1 不同故障位置下保护的验证

针对不同故障距离下的不对称故障进行仿真计算。图6为线路50 km、125 km和200 km处发生AG故障时对应的换流器母线侧电气量,其中故障发生在1 s,采用全波傅里叶算法对1.04~1.08 s的数据进行提取,采样率为2 kHz,取平均值得到计算结果。

表2展示了不同位置发生故障时的故障距离计算结果,其中 $d_{true}$ 为真实故障距离。图7展示了AG

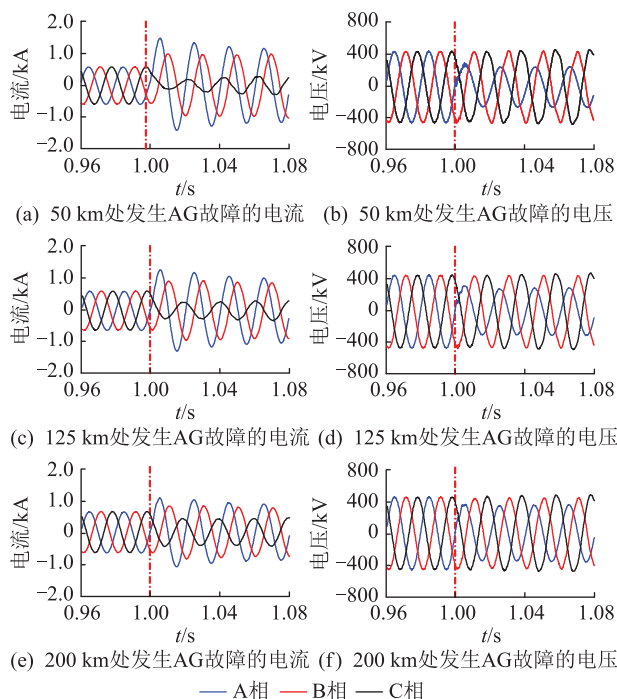


图6 西路不同位置发生故障AG时换流站母线侧仿真波形

Fig.6 Simulation waveforms at the bus side of inverter station when AG fault occurs in different fault locations

故障时的计算结果( $R_F = 50 \Omega$ ),其中图7(a)、(c)、(e)中的红色曲线划定了方向圆特性阻抗继电器距离保护I段(200 km)的动作区域,蓝色点对应的计算值为利用故障后40~80 ms数据计算得到的故障距离的平均值。图7(b)、(d)、(f)展示了利用故障后40~80 ms数据计算得到的故障距离的轨迹。

表2 不同故障位置下所提方法的故障距离计算结果  
Table 2 Calculation results of the fault distance of the proposed method under different fault locations

故障类型	$R_F/\Omega$	$d_{true}/\text{km}$	$d_{re}/\text{km}$
AG	50	50	55.8
		125	132.9
		200	210.5
BC	30	50	59.3
		125	131.0
		200	201.9
BCG	50	50	55.42
		125	133.0
		200	208.9

基于上述结果可知,在线路50 km、125 km和200 km处发生不对称故障时,所提方法均具有较高的准确度。且由于整定点的设置是自适应的,可以避免整定点设置在实际故障点后引发的计算结果畸变问题。

#### 4.2 不同过渡电阻下保护的验证

针对距离保护I段末端(200 km)经不同过渡

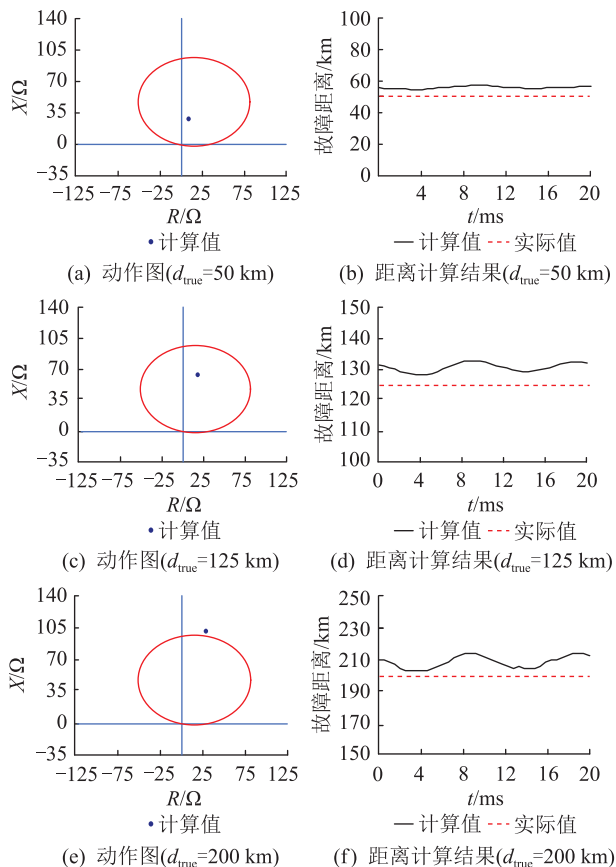


图7 不同故障位置下的故障距离计算结果

Fig.7 The calculation results of the fault distance under different fault locations

电阻故障时的场景进行了仿真计算。图8(a)展示了系统发生AG故障,且 $R_F = 10 \Omega$ 时所提方法的计算结果和方向圆特性阻抗继电器距离保护I段动作区域的位置关系;图8(b)展示了利用故障后40~80 ms数据计算得到的故障距离轨迹图。可见所提方法具有较好的准确度和稳定性。

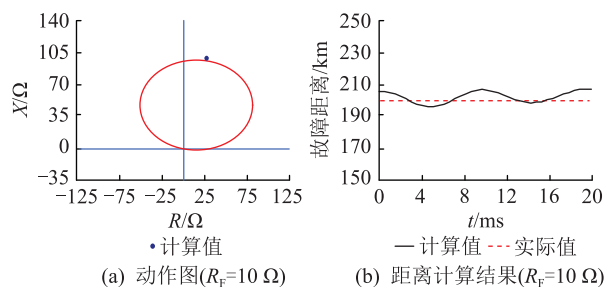


图8 过渡电阻为10 Ohms时的故障距离计算结果

Fig.8 The calculation results of the fault distance when fault resistance is 10 Ohms

表3则列写了 $R_F = 5 \Omega$ 和 $50 \Omega$ 时所提方法的计算结果,其中真实故障距离设置为200 km, $d$ 为故障后40~80 ms数据对应计算结果的平均值。比对图7(e)、(f)、图8和表3中的结果可知,所提方法具有较好的抗过渡电阻能力。

表 3 不同故障电阻下所提方法的故障距离计算结果

Table 3 Calculation results of the fault distance of the proposed method under different fault resistances

故障类型	$R_F/\Omega$	$d_{true}/\text{km}$	$d_{re}/\text{km}$
AG	5	200	203.1
	50	200	210.5
BC	5	200	198.6
	30	200	201.9
BCG	5	200	202.8
	50	200	208.9

4.3 和其他方法的对比

比较了所提方法、传统距离保护方法以及基于阻抗复平面的距离保护方法的性能。图 9 展示了传输线 175 km ( I 段区内) 和 225 km ( I 段区外) 发生 AG 故障时文中方法和基于阻抗复平面的距离保护方法计算结果的对比, 其中  $R_F$  设置为 50  $\Omega$ 。图 9 (a)、(c) 中红色曲线划定了方向圆特性阻抗继电器距离保护 I 段 (200 km) 的动作区域, 蓝色和紫色点对应的计算值为利用故障后 40~80 ms 数据计算得到的故障距离的平均值。图 9 (b)、(d) 为利用故障后 40~80 ms 数据计算得到的故障距离轨迹。

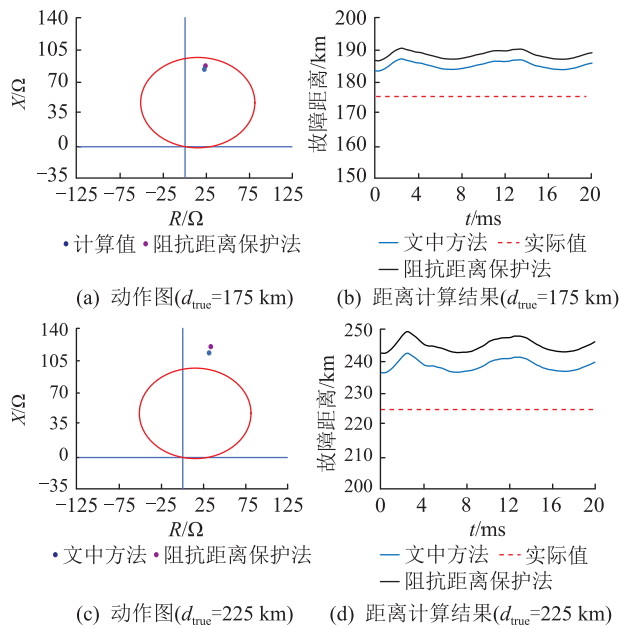


图 9 所提方法和其他方法的故障距离计算结果对比

Fig.9 Comparison of the fault distance calculation results between the proposed method and other methods

表 4 则列出了不同故障场景下文中方法经自适应整定修正后的故障距离计算结果和未经自适应整定时的计算结果, 表中结果均为利用故障后 40~80 ms 数据计算得到的平均值。基于图 9 和表 4 结果可知, 所提距离保护方法在被保护区发生区内故障时能够正确动作, 区外故障时不误动, 且在长

线中具有更好的性能。

表 4 经自适应整定修正后的故障距离计算结果和未经自适应整定时的计算结果

Table 4 Calculation results of the fault distance after adaptive setting correction and the calculation results without adaptive setting

故障类型	$R_F/\Omega$	$d_{true}/\text{km}$	未经自适应整定的结果 $d/\text{km}$	经自适应整定的结果 $d_{re}/\text{km}$
AG	10	202	208.6	205.5
		225	233.6	227.1
	50	202	219.3	214.7
		225	247.1	238.8
BC	10	202	197.8	203.8
		225	221.6	223.2
	30	202	199.2	204.1
		225	218.7	223.5
BCG	10	202	203.2	203.0
		225	228.9	227.5
	50	202	212.2	209.8
		225	240.4	235.9

表 5 则列出了不同故障场景下文中方法和传统测距式距离保护方法利用故障后 40~80 ms 数据计算得到的故障回路阻抗 (保护安装处至故障点处的等值正序阻抗) 的平均值。由表 5 可知, 文中方法具有较强的耐过渡电阻能力, 系统发生远端故障时能够可靠动作, 而传统测距式距离保护的计算结果和实际偏差较大, 可能误动。

表 5 文中方法和传统方法的故障回路阻抗计算结果

Table 5 Calculation results of the fault loop impedance of the proposed method and traditional method  $\Omega$

故障类型	$R_F$	$Z_{11} d_{true}$	文中方法所得阻抗	测距式距离保护所得阻抗
AG	50	26.3+j97.0	27.9+j103.1	192.0+j20.5
		29.3+j108.0	31.0+j114.6	252.0+j10.2
BC	30	26.3+j97.0	26.5+j98.0	63.9-j81.7
		29.3+j108.0	29.0+j107.1	148.4-j122.0
BCG	50	26.3+j97.0	27.3+j100.7	140.0+j70.6
		29.3+j108.0	30.7+j113.2	198.0+j65.5

5 结论

文中提出了一种适用于新能源并网系统的距离保护算法, 结论如下:

(1) 文中方法结合新能源并网换流器系统的控制特性、系统序阻抗特性和过渡电阻纯阻性特征, 运用较小的计算量即可求解故障距离, 可以应用于不对称故障。

(2) 所提方法通过自适应设置整定点, 并利用

沿线电气量计算公式推算整定点处的真实电气量,减弱了分布电容效应对距离保护的影响。且由于整定点的设定是自适应的,可以避免盲目设置整定点导致的计算结果畸变问题。

(3) 所提方法受过渡电阻和故障位置影响小,且能够减小分布参数效应对距离保护的影响。

值得指出的是,文中所提方法尚不能应用于三相不对称故障,后续将针对该问题进行深入研究。

### 致谢

本文得到国网江西省电力有限公司科技项目(52182020008H)资助,谨此致谢!

### 参考文献:

[1] TELUKUNTA V, PRADHAN J, AGRAWAL A, et al. Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: a review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 365-379.

[2] LIANG Y Y, LU Z J, LI W L, et al. A novel fault impedance calculation method for distance protection against fault resistance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 396-407.

[3] PALADHI S, PRADHAN A K. Adaptive distance protection for lines connecting converter-interfaced renewable plants[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(6): 7088-7098.

[4] 侯俊杰, 宋国兵, 常鹏, 等. 计及对端系统参数和送出线路分布参数影响的风电系统时域距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 106-116.

HOU Junjie, SONG Guobing, CHANG Peng, et al. Time-domain distance protection for a wind power system considering parameters of the remote end system and influence of outgoing line distribution parameters[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 106-116.

[5] 吴梓亮, 李一泉, 陈桥平, 等. 一种基于正序阻抗的输电线路接地距离保护参数整定方法[J]. 南方电网技术, 2020, 14(10): 96-102.

WU Ziliang, LI Yiquan, CHEN Qiaoping, et al. A parameter setting method of grounding distance protection for transmission line based on positive sequence impedance[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(10): 96-102.

[6] 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. Study on the influence of short-circuit current characteristics of a doubly-fed wind farm on distance protection and protection strategy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 18-27.

[7] 胡泽鹏, 李斌, 姚斌, 等. 基于误差权重估计的串补线路阻抗快速计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(8): 123-129, 137.

HU Zepeng, LI Bin, YAO Bin, et al. Fast calculation method for

impedance of series compensated lines based on error weight estimation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(8): 123-129, 137.

[8] 朱晓彤, 陆金凤, 谢华, 等. 带串联电抗器输电线路距离保护整定改进方法[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 156-160.

ZHU Xiaotong, LU Jinfeng, XIE Hua, et al. Improved setting method of distance protection for transmission line with series reactor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 156-160.

[9] 罗瑞, 樊艳芳, 刘群杰. 基于时域的交流直流混联系统抗过渡电阻的单相接地距离保护研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(12): 123-129.

LUO Rui, FAN Yanfang, LIU Qunjie. Research on anti-transition resistance single-phase ground distance protection of AC-DC hybrid power system based on time-domain[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(12): 123-129.

[10] 范小红, 孙士云, 王春又, 等. 适应于双馈风电场送出线不对称故障的时域距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 82-91.

FAN Xiaohong, SUN Shiyun, WANG Chunyou, et al. Time domain distance protection for asymmetric faults of an outgoing line in doubly-fed wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 82-91.

[11] 索南加乐, 钟应, 王增超, 等. 基于频域参数识别的距离保护算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 73-77, 104.

SUO Nanjiale, ZHONG Ying, WANG Zengchao, et al. Distance protection algorithm based on parameter identification in frequency domain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 73-77, 104.

[12] 马静, 马伟, 闫新, 等. 基于阻抗复数平面的自适应距离保护方案[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 290-296.

MA Jing, MA Wei, YAN Xin, et al. Impedance complex plane based adaptive distance protection scheme[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 290-296.

[13] 晁晨桐, 郑晓冬, 高飘, 等. 针对光伏场站送出线路不对称短路故障的自适应距离保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6681-6693.

CHAO Chenxu, ZHENG Xiaodong, GAO Piao, et al. Adaptive distance protection for transmission line of photovoltaic station during asymmetric short circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6681-6693.

[14] CHAO C X, ZHENG X D, WENG Y, et al. Adaptive distance protection based on the analytical model of additional impedance for inverter-interfaced renewable power plants during asymmetrical faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5): 3823-3834.

[15] 王峰渊, 方榆冬, 赵萍, 等. 一种适用于光伏场站送出线的自适应距离保护改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 127-134.

WANG Fengyuan, FANG Yudong, ZHAO Ping, et al. An improved adaptive distance protection scheme for the outgoing line of PV power station[J]. Power System Protection and Con-

- trol, 2019, 47(20):127-134.
- [16] BANAIEMOQADAM A, HOOSHYAR A, AZZOUZ M A. A control-based solution for distance protection of lines connected to converter-interfaced sources during asymmetrical faults [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3):1455-1466.
- [17] BANAIEMOQADAM A, HOOSHYAR A, AZZOUZ M A. A comprehensive dual current control scheme for inverter-based resources to enable correct operation of protective relays [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5):2715-2729.
- [18] 贾科, 宣振文, 朱正轩, 等. 光伏直流升压接入系统故障穿越协同控制方法[J]. 电网技术, 2018, 42(10):3249-3258. JIA Ke, XUAN Zhenwen, ZHU Zhengxuan, et al. A coordinated control and active protection for PV DC boosting integration system during FRT [J]. Power System Technology, 2018, 42(10):3249-3258.
- [19] CHANG P, SONG G B, HOU J J, et al. A single-ended fault location method for grid-connected converter system based on control and protection coordination [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4):3071-3081.
- [20] 胡永萍. 光伏并网逆变及低电压穿越控制策略研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014. HU Yongping. Research on photovoltaic grid-connected inverter and low voltage ride-through control strategy [D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [21] 姜卫东, 吴志清, 李王敏, 等. 电网不对称时抑制负序电流并网逆变器的控制策略 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(16):77-84.
- JIANG Weidong, WU Zhiqing, LI Wangmin, et al. Control strategy of suppressing negative sequence current of grid-connected inverter base on asymmetric grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16):77-84.
- [22] 朱逸凡, 赵宏程, 陈争光, 等. 适用于逆变型电源接入的配电网故障方向判别元件 [J]. 中国电力, 2019, 52(5):76-82. ZHU Yifan, ZHAO Hongcheng, CHEN Zhengguang, et al. Fault direction discriminating element used for the distribution network with IIG integration [J]. Electric Power, 2019, 52(5):76-82.
- [23] 黄涛, 陆于平, 凌启程, 等. 适应于双馈风电场的改进故障序分量选相方法 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4):123-128. HUANG Tao, LU Yuping, LING Qicheng, et al. Improved fault-sequence component phase selector applied to DFIG-based wind farm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4):123-128.

---

作者简介:



桂小智

桂小智(1987),男,硕士,高级工程师,从事继电保护及测试技术相关工作(E-mail: gxz61612@163.com);

宋国兵(1972),男,博士,教授,研究方向为电气系统继电保护;

常鹏(1997),男,博士在读,研究方向为电气系统继电保护。

## Distance protection method applicable to renewable energy grid-connected systems

GUI Xiaozhi<sup>1</sup>, SONG Guobing<sup>2</sup>, CHANG Peng<sup>2</sup>, CHANG Zhongxue<sup>2</sup>

(1. Research Institute of State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330096, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation of Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

**Abstract:** To further improve the performance of distance protection in renewable energy systems, a distance protection method is proposed, which considers the effects of control system and the distributed capacitance effect of the line. When an asymmetric fault occurs in the system, combined with the control characteristics of the converter, the sequence impedance characteristics of the grid and the pure resistive feature of the fault resistance, three unknowns in the fault loop equation can be eliminated, and the solution of the fault distance can be solved in the R-L model. Then, the setting point is set based on the calculation results in the R-L model, and the real electrical quantity at the setting point can be deduced by the calculation formula in Bergeron model. Finally, the equation from the setting point to the fault point is simultaneously solved to reduce the distributed capacitance effect on the distance protection. The simulation results testify that the method is less influenced by the fault features of the converter and fault resistance. It still has good performance in long line.

**Keywords:** renewable energy grid-connected system; distance protection; adaptive setting; current balanced control; distributed parameter model; fault ride through

(编辑 钱悦)