

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241195

# 基于差动正序分量波形相似度的海上风电 低频输电线路保护方法

高淑萍<sup>1,2</sup>, 周永宁<sup>1,2</sup>, 王晨清<sup>3</sup>, 陈实<sup>3</sup>, 宋国兵<sup>4</sup>, 权喆<sup>1,2</sup>

(1. 西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安市电气设备状态监测与供电安全重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 4. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 海上风电低频输电线路故障受双侧电力电子换流器控制策略影响, 其故障特征以及对传统保护的影响较为复杂。基于双端换流器控制策略和故障复合序网, 从理论上分析传统电流差动保护的适应性, 得到存在拒动风险的结论。结合故障后电压、电流波形特点, 提出基于差动正序分量波形相似度的保护方法。该方法首先提取线路两侧保护安装处电流与电压的故障分量, 利用对称分量法得到故障分量所对应差动电流与差动电压的正序分量, 对正序差动电压进行修正。然后, 利用改进余弦相似度计算差动电流与修正差动电压正序分量的相关程度, 通过相关性的差异来识别区内、外故障。最后, 在 PSCAD 中搭建了海上低频输电系统模型, 对线路中发生不同故障位置、故障类型、不同过渡电阻和采样频率的故障情况进行分析, 验证了所提保护方法的快速性和有效性。

**关键词:** 海上风电; 低频输电系统; 线路保护; 对称分量法; 改进余弦相似度

## Protection method for offshore wind power low-frequency transmission lines based on differential positive-sequence component waveform similarity

GAO Shuping<sup>1,2</sup>, ZHOU Yongning<sup>1,2</sup>, WANG Chenqing<sup>3</sup>, CHEN Shi<sup>3</sup>, SONG Guobing<sup>4</sup>, QUAN Zhe<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Xi'an Key Laboratory of Electrical Equipment Condition Monitoring and Power Supply Security, Xi'an 710054, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

4. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Fault characteristics in offshore wind power low-frequency transmission lines are significantly affected by the control strategies of power converters on both ends, making fault behavior and its impact on traditional protection schemes complex. Based on the control strategy of the converters at the two ends and the fault composite sequence network, this paper theoretically analyzes the applicability of conventional current differential protection and concludes that there is a risk of malfunction or failure to operate. Based on the characteristics of voltage and current waveforms after faults, a protection method based on the waveform similarity of the positive-sequence differential components is proposed. This method first extracts the fault components of current and voltage at the protection installation points on both sides of the line. The symmetrical component method is then used to obtain the positive-sequence components of the differential current and voltage, and the positive sequence differential voltage is corrected accordingly. Then, an improved cosine similarity measure is used to calculate the correlation between the positive sequence components of the differential current and the corrected differential voltage, while the difference in correlation is used to distinguish between internal and external faults. Finally, a PSCAD offshore low-frequency transmission system model is built, and fault scenarios with various fault locations, types, transition resistances, and sampling frequencies are analyzed. The results verify the speed and effectiveness of the proposed protection method.

This work is supported by the General Program of Natural Science Foundation of Shaanxi Province (No. 2024JC-YBMS-792).

**Key words:** offshore wind power; low-frequency transmission system; line protection; symmetrical component method; improved cosine similarity

基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目资助(2024JC-YBMS-792); 国家电网有限公司总部科技项目资助(52094020006U)

## 0 引言

近年来, 风力发电已经成为新能源发电的主力<sup>[1-3]</sup>。相较于柔性直流输电和交流输电, 海上低频输电作为一种全新的风电并网方式受到广泛关注<sup>[4-5]</sup>。然而, 低频输电系统两侧换流器均采用电力电子型元件, 其故障电流受控于换流器控制策略, 故障特征异于传统电源, 对传统差动保护在低频输电系统中的适应性产生巨大挑战<sup>[6-8]</sup>。

目前, 对于低频输电系统的保护研究正处于起步阶段<sup>[9-11]</sup>。文献[12]提出了基于电流相似度的风电场交流送出线路保护原理, 但并未分析双侧电力电子换流器的控制策略。文献[13]对海上风电低频输电线路故障特征及其对保护的影响进行分析, 发现电流差动保护存在难以适应的问题。文献[14]通过分析不同故障时低频输电线等效阻抗的特征, 提出了基于等效序阻抗差异指标的差动保护优化方法。文献[15]提出基于时域模型识别的纵联保护方案, 但故障初瞬的冲激将导致电流求导产生较大误差, 影响保护的可靠性。文献[16]通过虚拟电容补偿, 利用交叉熵识别低频输电线路的区内、外故障。文献[17]基于控保协同的思路, 对电流差动保护的性能进行提升。综上所述, 亟待研究海上低频输电线路新的保护原理。

鉴于上述原因, 本文开展海上低频输电线路保护原理的研究。针对两侧换流器负序电流抑制导致的保护灵敏度下降等问题, 提出了基于差动正序分量波形相似度的海上风电低频输电线路保护方法。该方法首先提取线路两侧保护安装处电流与电压的故障分量, 并利用对称分量法计算差动电流与差动电压的正序分量, 对差动电压进行修正。然后利用改进余弦相似度计算差动电流与修正差动电压正序分量波形的相关性, 根据差动正序分量波形相关性的差异, 进行区内、区外故障判别。最后, 在 PSCAD 软件中建立低频输电系统模型并输出故障数据, 利用 Matlab 对故障数据进行处理, 对保护原理及性能进行验证。仿真结果表明, 本文所提方法不受噪声、过渡电阻的影响, 能够快速识别区内外故障。

## 1 海上风电低频输电系统拓扑

海上低频输电系统拓扑如图 1 所示。海上风电场由直驱式永磁同步风力发电机组(permanent magnet synchronous generator, PMSG)、风机侧换流器(rotor side converter, RSC)以及并网侧换流器(grid-side converter, GSC)构成。模块化多电平矩阵换流器(modular multilevel matrix converter, M3C)安

装于陆地, 可将低频电流转换为工频后并至电网。

本文以低频输电线路为研究对象,  $f_1 - f_5$  为发生在低频线路区内、区外的故障位置。其中  $f_1$  为发生在 M 侧的区外故障,  $f_2 - f_4$  分别表示发生在距离 M 侧 10 km、50 km 以及 90 km 的区内故障,  $f_5$  为发生在 N 侧的区外故障。

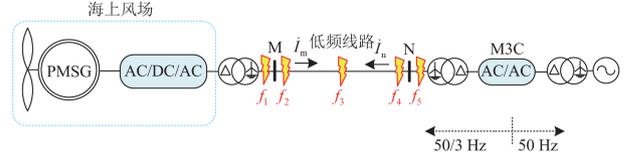


图 1 海上风电低频输电系统拓扑

Fig. 1 Topology of offshore wind low-frequency transmission system

## 2 双侧换流器控制原理

与传统电力系统不同, 低频输电线路两侧换流器均为电力电子型电源, 其控制策略会对故障特征产生显著影响。

### 2.1 风电场侧控制原理

直驱式永磁同步电机换流器为全功率型, 在故障时切换为低电压穿越策略<sup>[18]</sup>, 向电网提供动态无功电流。在低频输电线路故障期间, 风电场故障时正、负序电流分别为<sup>[19]</sup>

$$\begin{cases} i_{WF+} = i_{WF+,d}^* \cos(\omega t + \theta_{WF+}) - i_{WF+,q}^* \sin(\omega t + \theta_{WF+}) \\ i_{WF-} = i_{WF-,d}^* \cos(\omega t + \theta_{WF-}) - i_{WF-,q}^* \sin(\omega t + \theta_{WF-}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\theta_{WF+}$ 、 $\theta_{WF-}$  分别为正序、负序电流相角;  $i_{WF+}$ 、 $i_{WF-}$  分别为风电场故障时正、负序电流;  $i_{WF+,d}^*$ 、 $i_{WF+,q}^*$  分别为正序电流的  $d$ 、 $q$  轴分量参考值;  $i_{WF-,d}^*$ 、 $i_{WF-,q}^*$  分别为负序电流的  $d$ 、 $q$  轴分量参考值。

式(1)中,  $i_{WF+,d}^*$  和  $i_{WF+,q}^*$  为

$$\begin{cases} i_{WF+,d}^* = -\min\left(\frac{P_{WF}}{u_{WF+}}, \sqrt{i_{WF+,max}^2 - (i_{WF+,q}^*)^2}\right) \\ i_{WF+,q}^* = 0 & u_{WF+} > 0.9 \\ i_{WF+,q}^* = k_{WF+}(0.9 - u_{WF+}) & 0.2 \leq u_{WF+} \leq 0.9 \\ i_{WF+,q}^* = 0.7k_{WF+} & u_{WF+} < 0.2 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $P_{WF}$  为风机额定有功功率;  $u_{WF+}$  为风机端口正序电压幅值;  $k_{WF+}$  为正序无功电流比例系数;  $i_{WF+,max}$  为风机换流器电流限定值。

为保证换流器正常运行, 避免过流, 通常采用负序电流抑制的方法实现故障限流<sup>[20]</sup>, 负序有功、无功电流  $i_{WF-,d}^*$ 、 $i_{WF-,q}^*$  为

$$\begin{cases} i_{WF-,d}^* = 0 \\ i_{WF-,q}^* = 0 \end{cases} \quad (3)$$

由式(1)一式(3)可得, 海上风电场的故障电流由正序电流决定。故障后, 随着  $u_{WF+}$  的减小, 有功电流逐渐减小, 无功电流增大, 风电场呈现受控电流源的特性。

## 2.2 M3C 侧控制原理

M3C 作为变频器, 在送出系统中连接工频 50 Hz 和低频 50/3 Hz。本文采用文献[21]提出的双  $dq$  坐标变换以实现低频侧与工频侧的解耦控制, 此时可以忽略工频侧的控制影响, 不对称故障时采用负序电流抑制策略。M3C 低频侧的控制策略如图 2 所示。

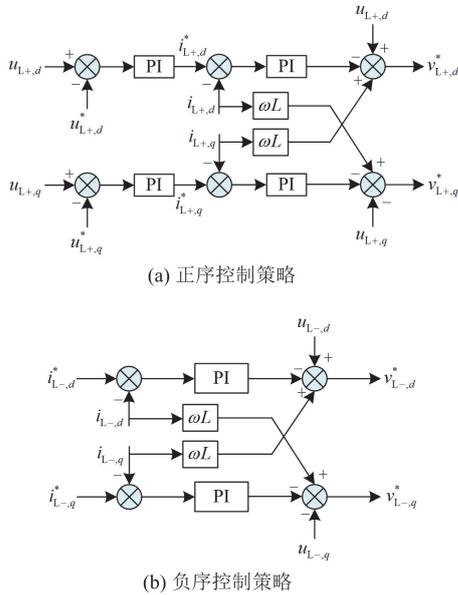


图 2 M3C 低频侧的控制策略

Fig. 2 M3C low-frequency side control strategy

系统正常运行时 M3C 输出的有功功率  $P_L$  和无功功率  $Q_L$  为

$$\begin{cases} P_L = u_{L+,d} i_{L+,d} + u_{L+,q} i_{L+,q} \\ Q_L = u_{L+,d} i_{L+,q} - u_{L+,q} i_{L+,d} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $i_{L+,d}$ 、 $i_{L+,q}$  分别为 M3C 低频侧正序电流的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $u_{L+,d}$ 、 $u_{L+,q}$  分别为低频侧正序电压的  $d$ 、 $q$  轴分量。

输电线路故障时, M3C 采用负序电流抑制策略, 仅提供正序电流。此时有

$$\begin{cases} i_{L-,d}^* = 0 \\ i_{L-,q}^* = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $i_{L-,d}^*$ 、 $i_{L-,q}^*$  分别为 M3C 负序电流的  $d$ 、 $q$  轴参考值。

实际上, 采取负序电流抑制可能使非故障相过电压, 此时 M3C 采用  $v/f$  动态降压控制为风电场提供电压支撑, 降低正序电压参考值以保证低频输电系统正常运行。因此, M3C 在故障后体现出受控电压源特性。

M3C 低频侧输出电流有效值  $i_{M3C}$  为

$$i_{M3C} = \sqrt{(i_{L+,d})^2 + (i_{L+,q})^2} \quad (6)$$

综上, 低频输电系统双端电源所提供的故障电流均不含有负序分量, 两侧电流在故障期间受换流器控制策略影响, 这种故障特征与传统系统的故障电流特征明显不同。

## 3 电流差动保护适应性分析

传统电流差动保护基于基尔霍夫电流定律, 其动作判据为<sup>[22]</sup>

$$I_{cd} = |i_m + i_n| \geq k |i_m - i_n| = k I_{zd} \quad (7)$$

式中:  $I_{cd}$  为差动电流;  $i_m$ 、 $i_n$  分别为两侧保护安装处测得的电流;  $I_{zd}$  为制动电流;  $k$  为制动系数,  $0 < k < 1$ 。

由第 2 节分析可知, 低频输电线路两侧换流器均进行负序电流抑制, 此时要研究电流差动保护的适应性, 就需研究  $i_{m\phi}$  和  $i_{n\phi}$  与双侧电源电流的关系。其中  $\phi = A、B、C$ 。

### 3.1 单相接地故障

为简化推导, 忽略图 1 中风机滤波器、M3C 端口电容、线路对地电容等支路, 结合故障边界条件, 可得到图 3 所示 A 相接地故障时的故障复合序网。图中:  $R_f$  为过渡电阻;  $Z_m$  为线路 M 侧的序阻抗;  $Z_n$  为线路 N 侧的序阻抗;  $i_{WF}$  为风电场的电源电流;  $i_{M3C}$  为 M3C 的电源电流;  $i_f$  为故障电流; 变量下标“+”、“-”、“0”分别对应正、负、零序分量, 后文出现的变量下标含义与此相同。

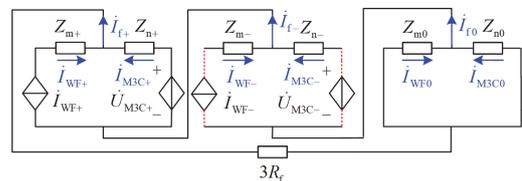


图 3 单相接地故障复合序网

Fig. 3 Single-phase ground fault composite sequence network

图 3 中, 因双侧换流器均采用负序电流抑制策略, 导致负序网络开路, 但负序电流仍可通过风机滤波器、M3C 端口电容、线路对地电容等支路形成回路, 负序电流并不严格为 0, 故负序网络采用虚线表示。

根据故障复合序网, 有

$$\begin{cases} \dot{I}_{f+} = \dot{I}_{WF+} + \dot{I}_{M3C+} \\ \dot{I}_{f-} = \dot{I}_{WF-} + \dot{I}_{M3C-} \\ \dot{I}_{f0} = \dot{I}_{f-} = \dot{I}_{f0} \end{cases} \quad (8)$$

对于低频输电线路, 有

$$\begin{cases} \dot{I}_{m+} = \dot{I}_{WF+} \\ \dot{I}_{n+} = \dot{I}_{M3C+} \end{cases} \quad (9)$$

同理,  $\dot{I}_{m-} = \dot{I}_{WF-}$ ,  $\dot{I}_{n-} = \dot{I}_{M3C-}$ 。对于 A 相接地故障, 将序电流转化为三相电流。此时, A 相的 M、N 侧电流为

$$\begin{cases} \dot{I}_{mA} = \dot{I}_{WF+} + \dot{I}_{WF-} + \dot{I}_{WF0} \\ \dot{I}_{nA} = \dot{I}_{M3C+} + \dot{I}_{M3C-} + \dot{I}_{M3C0} \\ \dot{I}_{f0} = \dot{I}_{WF0} + \dot{I}_{M3C0} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\dot{I}_{mA}$ 、 $\dot{I}_{nA}$  分别为保护安装 M、N 处测得的 A 相电流。

由于风机和 M3C 均采用负序电流抑制策略, 导致  $\dot{I}_{f-} = 0$ 。由式(7)一式(10)可得 A 相差动电流为

$$\begin{cases} \dot{I}_{fA} = \dot{I}_{f0} = \dot{I}_{f-} \\ I_{cdA} = |\dot{I}_{fA}| \approx 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $I_{cdA}$  为 A 相电流差动电流。

$f_3$  点发生 A 相金属性接地时 A 相差动电流与制动电流如图 4 所示。

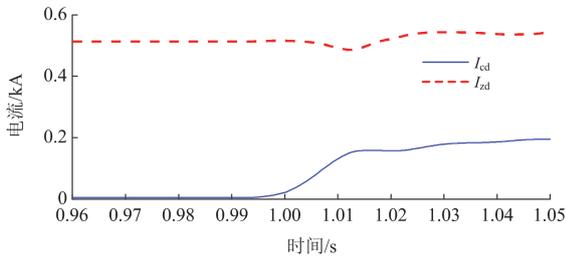


图 4 发生 A 相接地时差动电流与制动电流

Fig. 4 Differential current and braking current in case of grounding of phase A

由图 4 可得, 在 1 s 发生故障时, 虽然 M3C 端口电容等支路的存在导致故障后的差动电流不完全等于零, 但其值仍远小于制动电流, 保护拒动。

### 3.2 两相短路故障

BC 相间故障时的复合序网如图 5 所示。对于 BC 相间故障,  $\dot{I}_{f+} = -\dot{I}_{f-}$ ,  $\dot{I}_{f0} = 0$ 。以 B 相为例, 有

$$\begin{cases} \dot{I}_{mB} = e^{j240^\circ} \dot{I}_{WF+} + e^{j120^\circ} \dot{I}_{WF-} \\ \dot{I}_{nB} = e^{j60^\circ} \dot{I}_{WF+} + e^{j60^\circ} \dot{I}_{WF-} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\dot{I}_{mB}$ 、 $\dot{I}_{nB}$  分别为保护安装 M、N 处测得的 B 相电流。

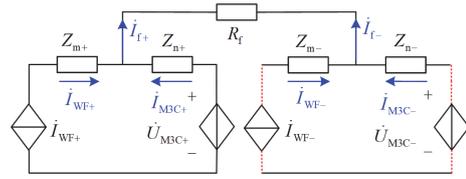


图 5 两相短路故障复合序网

Fig. 5 Two-phase short circuit fault composite sequence network

由式(12)可得

$$I_{cdB} = |(e^{j60^\circ} + e^{j240^\circ}) \dot{I}_{WF+}| \approx 0 \quad (13)$$

式中:  $I_{cdB}$  为 B 相电流差动电流。

可见, 与 A 相接地故障的情况相似, 在负序电流抑制的情况下故障电流也近似为零, 保护的灵敏度下降甚至出现拒动的情况。

### 3.3 两相短路接地故障

BC 两相接地故障的复合序网如图 6 所示。

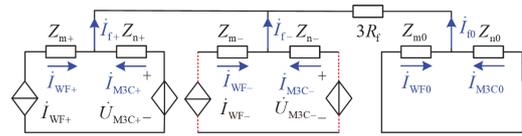


图 6 两相短路接地故障复合序网

Fig. 6 Two-phase short circuit ground fault composite sequence network

对于 BC 接地故障,  $\dot{I}_{f+} + \dot{I}_{f-} + \dot{I}_{f0} = 0$ 。仍以 B 相为例, 有

$$\begin{cases} \dot{I}_{mB} = e^{j240^\circ} \dot{I}_{WF+} + e^{j120^\circ} \dot{I}_{WF-} + \dot{I}_{WF0} \\ \dot{I}_{nB} = e^{j240^\circ} \dot{I}_{M3C+} + e^{j120^\circ} \dot{I}_{M3C-} + \dot{I}_{M3C0} \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可得

$$I_{cdB} = |\dot{I}_{f0} - e^{j60^\circ} \dot{I}_{f+}| \quad (15)$$

$f_3$  点发生 BC 相金属性接地时 B 相差动电流与制动电流如图 7 所示。同上述分析一致, 即使负序电流抑制为 0, 两侧电源的正序和零序电流仍会提供故障电流, 保护可以动作。

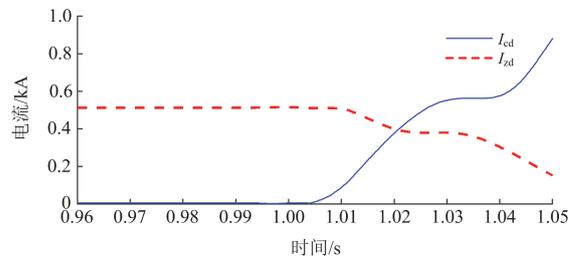


图 7 发生 BC 相接地时差动电流与制动电流

Fig. 7 Differential current and braking current when BC phase grounding occurs

### 3.4 三相短路故障

ABC 三相短路故障的复合序网如图 8 所示。

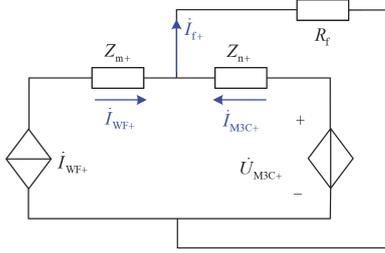


图 8 三相短路故障复合序网

Fig. 8 Three-phase short-circuit fault composite sequence network

对于三相故障,  $i_{f-} = i_{f0} = 0$ 。以 A 相为例, 有

$$\begin{cases} i_{mA} = i_{WF+} \\ i_{nA} = i_{M3C+} \end{cases} \quad (16)$$

同上所述, 有

$$I_{cdA} = |i_{WF+} + i_{M3C+}| \quad (17)$$

故障电流与差动电流由正序电流提供, 保护动作。

由上述分析可知, 在发生单相接地及相间故障时, 因双侧换流器采取负序电流抑制策略会使得保护的灵敏度降低, 甚至产生拒动风险。而对于两相接地以及三相短路而言, 保护理论上可以动作, 但保护的灵敏度需要进一步计算。

## 4 基于差动正序分量波形相似度的保护方法

通过第 3 节对不同故障情况下的复合序网进行分析可知, 低频输电线路故障特征异于传统输电线路, 给传统保护带来了巨大挑战。因此需研究新的保护方法。

### 4.1 区外故障模型

以单相线路为例对区内、外故障模型进行分析, 低频输电线路发生区外故障时系统故障附加网络拓扑如图 9 所示。

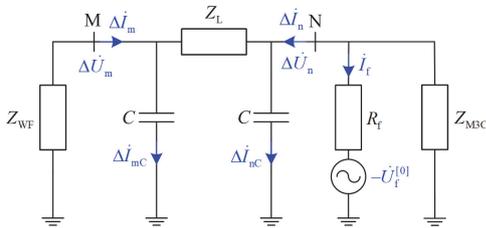


图 9 区外故障附加网络拓扑图

Fig. 9 Topology diagram of external fault-attached network

图 9 中:  $Z_{WF}$ 、 $Z_{M3C}$  分别表示风电场和 M3C 侧的等值阻抗;  $C$  为低频线路的对地电容;  $Z_L$  为低

频输电线路阻抗;  $-U_f^{j0}$  为故障附加电压源;  $U_f^{j0}$  为系统正常运行时的故障点电压;  $i_f$  为流入故障点的电流, 由故障附加电压源提供<sup>[23]</sup>;  $\Delta U_m$ 、 $\Delta U_n$ 、 $\Delta i_m$ 、 $\Delta i_n$  分别为两侧保护安装处所测量到的电压、电流故障分量;  $\Delta i_{mC}$  和  $\Delta i_{nC}$  为流入线路两端对地电容的电流故障分量。

由图 9 可知, 线路两端电容电流满足:

$$\begin{cases} \Delta i_{mC} = C_m \Delta U_m e^{j90^\circ} \\ \Delta i_{nC} = C_n \Delta U_n e^{j90^\circ} \end{cases} \quad (18)$$

当发生区外故障时, 两侧电源提供的故障电流、电压分别为

$$\begin{cases} \Delta i_m + \Delta i_n = \Delta i_{mC} + \Delta i_{nC} \\ \Delta U_m + \Delta U_n = \Delta U_{cd} \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $\Delta U_{cd}$  为差动电压故障分量。

由式(7)、式(18)和式(19)可得

$$\Delta i_{cd} = C \Delta U_{cd} e^{j90^\circ} \quad (20)$$

式中:  $\Delta i_{cd}$  为差动电流故障分量。

因此由式(20)可知, 当系统发生区外故障时, 差动电流波形超前于差动电压波形, 且相差  $90^\circ$ 。

### 4.2 区内故障模型

低频输电线路发生区内故障时的附加网络拓扑如图 10 所示。图中:  $Z_{mL}$ 、 $C_m$  分别为故障点和母线 M 之间的线路阻抗和对地电容;  $Z_{nL}$ 、 $C_n$  分别为故障点和母线 N 之间的线路阻抗和对地电容。

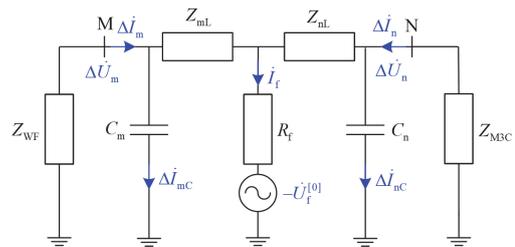


图 10 区内故障附加网络拓扑图

Fig. 10 Topology diagram of internal fault-attached network

由图 10 可知, 线路两端电容满足:

$$\begin{cases} \Delta i_{mC} = C_m \Delta U_m e^{j90^\circ} \\ \Delta i_{nC} = C_n \Delta U_n e^{j90^\circ} \end{cases} \quad (21)$$

双端电源提供的短路电流和电容电流的关系为

$$\Delta i_m + \Delta i_n = \Delta i_{mC} + \Delta i_{nC} + i_f \quad (22)$$

由式(21)和式(22)可知, 差动电压和差动电流满足:

$$\Delta i_{cd} = C_m \Delta U_{cd} e^{j90^\circ} + (C_n - C_m) \Delta U_n e^{j90^\circ} + i_f \quad (23)$$

由式(23)可知,当输电线路发生区内故障时,由于存在  $(C_n - C_m)\Delta\dot{U}_n e^{j90^\circ} + \dot{I}_f$ ,使得差动电流不再超前差动电压  $90^\circ$ 。

由上述分析易知,当系统发生区外故障时,差动电流波形超前于差动电压波形  $90^\circ$ ;当系统发生区内故障时,差动电流波形不再超前于差动电压波形  $90^\circ$ ,可基于二者的波形差异构成保护判据。

### 4.3 保护启动判据

纵联保护要求元件能迅速、灵敏地动作,本文选取 M 侧某一相电流突变量作为启动判据。

$$|\Delta i_{m\phi}| > I_{OP} \quad (24)$$

式中:  $I_{OP}$  为启动电流,取  $0.1 I_N$ ,  $I_N$  为线路的额定电流值。

### 4.4 保护动作判据

目前通常采用余弦相似度判断相量间的波形关系。然而风电场零出力时传统余弦相似度将出现 0/0 的情况,无法进行计算,因此本文引入修正因子,对余弦相似度法进行改进。

$$\mathfrak{J}_{(x,y)} = \frac{\left[ \sum_{n=1}^N x(n)y(n) \right] + \gamma}{\sqrt{\sum_{n=1}^N x(n)^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N y(n)^2} - \gamma} \quad (25)$$

式中:  $\mathfrak{J}_{(x,y)}$  表示余弦相似度计算结果;  $x(n)$  和  $y(n)$  分别表示用于计算余弦相似度的输入值;  $N$  为采样点的个数;  $\gamma$  为修正因子,取 0.001。

故障发生后,两侧保护安装处提取到的电流与电压具有频率偏移的特性,同时因为三相之间存在耦合,使得保护算法有较大误差。故本文利用对称分量法提取序分量,以解除三相间的耦合<sup>[22]</sup>。考虑到风电场与 M3C 侧均采用负序电流抑制策略,零序电流无法识别接地故障,本文利用差动正序分量波形相似度进行故障诊断。

由式(25)可知,当  $x = e^{\pm j90^\circ} y$  时,将无法确定差动电压与差动电流的波形相似性。故本文对差动电压进行修正,此时,令

$$\begin{cases} x = \Delta \dot{I}_{cd+} \\ y = e^{j90^\circ} \Delta \dot{U}_{cd+} \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $\Delta \dot{I}_{cd+}$ 、 $\Delta \dot{U}_{cd+}$  分别表示经对称分量法计算出的正序差动电流、电压故障分量。

当发生区外故障时,此时正序修正差动电压与差动电流满足正相关,所计算的  $\mathfrak{J}_{(x,y)} \approx 1$ 。当发生区内故障时,修正差动电压与差动电流不满足正相关,此时  $\mathfrak{J}_{(x,y)} \ll 1$ 。

根据上述分析,给出以下基于差动正序分量波

形相似度的保护判据,如式(27)所示。

$$\mathfrak{J}_{(x,y)} < \mathfrak{J}_{set} \quad (27)$$

式中:  $\mathfrak{J}_{set}$  为保护动作判据的整定值。

由于相量提取和互感器数据传输中存在误差,同时为保证波形相关性分析算法有足够的选择性和灵敏度<sup>[24]</sup>,可以将整定值设置为  $\mathfrak{J}_{set} = 0.8$ 。保护流程如图 11 所示。

## 5 仿真实验

在 PSCAD 中搭建如图 1 所示的海上低频输电系统模型,具体参数如下。

海上风电场为 50 台 2 MW 的等值风机,线路长度为 100 km,电压为 220 kV,线路的正序电阻和电抗分别为  $0.029 \Omega/\text{km}$  与  $0.014 \Omega/\text{km}$ ,零序单位电阻与电抗分别为  $0.153 \Omega/\text{km}$  与  $0.027 \Omega/\text{km}$ 。故障发生时刻为 1 s,采样频率为 4 kHz,计算数据窗长为 30 ms。

### 5.1 保护原理验证

为验证本文所提保护原理的正确性,本文对系统  $f_3$  点和  $f_5$  点发生 A 相金属性接地(AG)和三相对称故障(ABC)情况进行分析验证。后文出现的故障类型均进行简记,其中 G 表示接地。

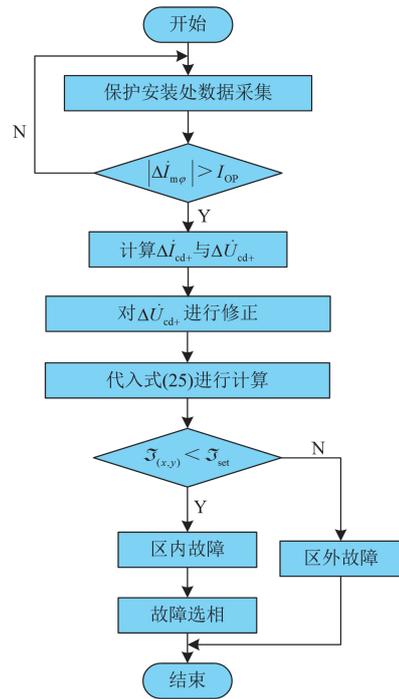


图 11 保护流程图

Fig. 11 Protection flowchart

不同故障位置发生 AG 与 ABC 故障时,差动电流与修正差动电压的正序分量波形如图 12 所示。故障发生时刻为 1 s。为便于表示,差动电压与电流均经归一化处理,图中  $\dot{U}'_{cd+}$  表示修正差动电压。

由图 12(a)、图 12(c)可得, 发生区内故障后, 修正差动电压与电流的正序分量波形已不再呈现正相关。而图 12(b)、图 12(d)则展示了发生区外故障时修正差动电压与差动电流正序分量波形, 此时差动电流的正序分量与修正差动电压波形基本重合, 相似度较高。保护原理正确, 具有可行性。

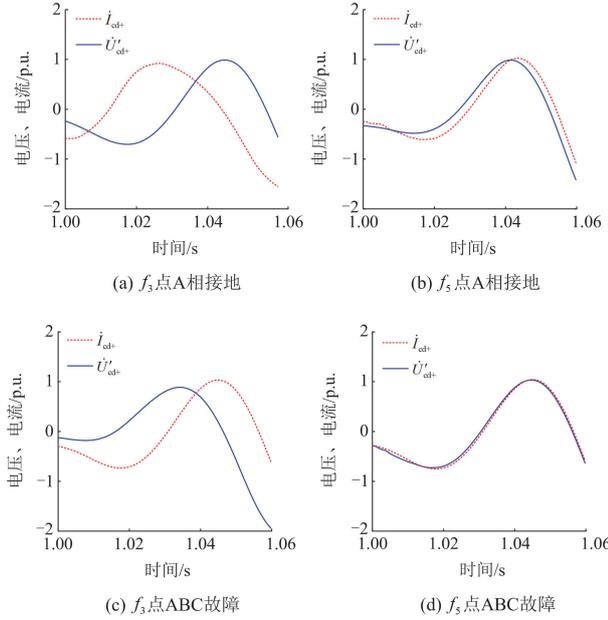


图 12 不同故障下正序修正电压、电流故障分量

Fig. 12 Positive sequence correction voltage and current fault components under different faults

图 13 为  $f_3$  和  $f_5$  点发生不同故障时的  $\mathcal{I}$  值。

由图 13 可得, 区外故障时, 不同故障类型下, 得到的  $\mathcal{I}$  值均在 1 附近, 保护不误动。区内故障时, 得到的  $\mathcal{I}$  值均小于 0.8, 此时保护动作。

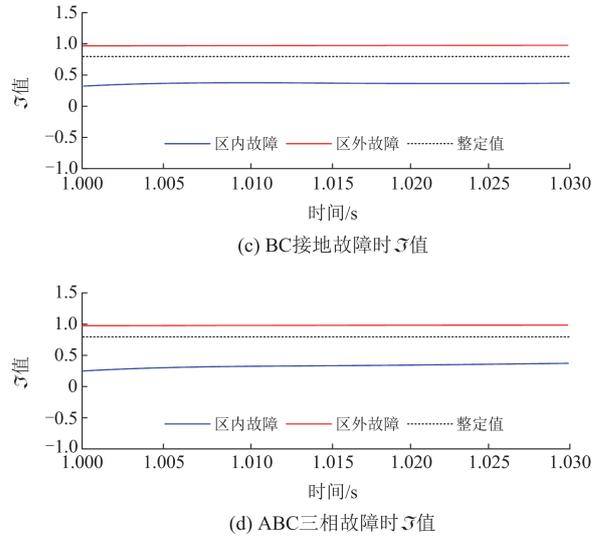
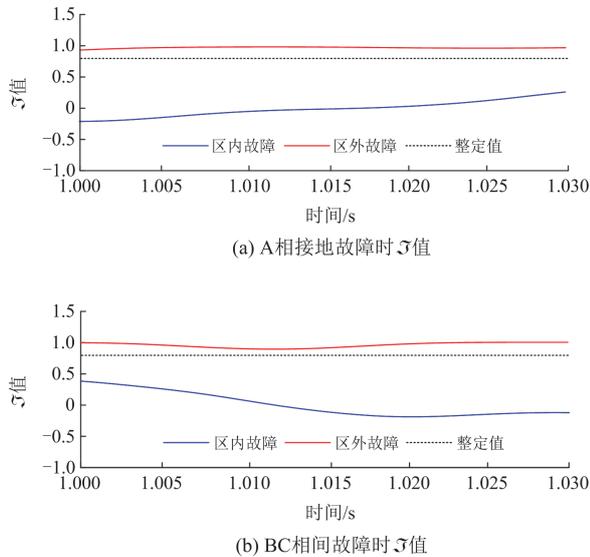


图 13 不同故障时正序分量  $\mathcal{I}$  值

Fig. 13 Positive sequence component  $\mathcal{I}$  at different faults

表 1 给出低频输电线路  $f_3$  处发生不同故障时的  $\mathcal{I}$  值及故障区域判断结果。

表 1 线路中点 50 km 处发生故障时故障区域判别

Table 1 Fault area discrimination when a fault occurs at 50 km in the midpoint of the line

故障类型	$\mathcal{I}$ 值	故障区域判断
AG	-0.209	区内
BG	0.431	区内
CG	0.045	区内
AB	-0.078	区内
AC	0.133	区内
BC	0.355	区内
ABG	0.303	区内
ACG	0.189	区内
BCG	0.362	区内
ABC	0.282	区内

由表 1 可知, 当系统发生区内故障时, 保护均可准确动作, 且不受故障类型影响。

## 5.2 故障位置对保护性能的影响

在工程实际中, 故障位置、故障类型及过渡电阻均会影响保护性能, 故表 2 给出了不同故障位置与故障类型下的保护动作情况。限于文章篇幅, 表 2 只给出了 AG、BC、BCG、ABC 故障。

由表 2 可得, 区内故障时, 得到的  $\mathcal{I}$  值均小于整定值, 且最大值为 0.433, 远小于 0.8, 此时保护均可正常动作。区外故障时,  $\mathcal{I}$  值均大于 0.94, 保护可靠不动作。

## 5.3 过渡电阻对保护性能的影响

海上风电经柔性直流送出线路故障时的过渡电

阻一般不超过  $100 \Omega^{[25]}$ , 故本文验证在过渡电阻为  $20 \Omega$ 、 $50 \Omega$  与  $100 \Omega$  下的保护性能。表 3 给出了  $f_1$  和  $f_2$  点发生故障时, 在不同过渡电阻情况下的保护动作情况。

表 2 不同故障位置下保护动作情况

Table 2 Protection action under different fault locations

故障位置	故障类型	$\mathfrak{J}$ 值	故障区域判断
$f_1$	AG	0.944	区外
	BC	0.993	区外
	BCG	0.990	区外
	ABC	0.994	区外
$f_2$	AG	<b>-0.214</b>	<b>区内</b>
	BC	<b>0.331</b>	<b>区内</b>
	BCG	<b>0.305</b>	<b>区内</b>
	ABC	<b>0.293</b>	<b>区内</b>
$f_4$	AG	<b>-0.231</b>	<b>区内</b>
	BC	<b>0.433</b>	<b>区内</b>
	BCG	<b>0.343</b>	<b>区内</b>
	ABC	<b>0.282</b>	<b>区内</b>
$f_5$	AG	0.943	区外
	BC	0.993	区外
	BCG	0.994	区外
	ABC	0.998	区外

表 3 不同过渡电阻下保护动作情况

Table 3 Protection action under different transition resistances

故障位置	过渡电阻/ $\Omega$	故障类型	$\mathfrak{J}$ 值	故障区域判断
$f_1$	20	AG	0.989	区外
		BC	0.996	区外
		BCG	0.997	区外
		ABC	0.993	区外
	50	AG	0.996	区外
		BC	0.998	区外
		BCG	0.999	区外
		ABC	0.993	区外
	100	AG	0.992	区外
		BC	0.990	区外
		BCG	0.996	区外
		ABC	0.992	区外
$f_2$	20	AG	<b>-0.204</b>	<b>区内</b>
		BC	<b>0.354</b>	<b>区内</b>
		BCG	<b>0.350</b>	<b>区内</b>
		ABC	<b>0.289</b>	<b>区内</b>
	50	AG	<b>-0.120</b>	<b>区内</b>
		BC	<b>0.341</b>	<b>区内</b>
		BCG	<b>0.364</b>	<b>区内</b>
		ABC	<b>0.281</b>	<b>区内</b>
	100	AG	<b>-0.057</b>	<b>区内</b>
		BC	<b>0.321</b>	<b>区内</b>
		BCG	<b>0.365</b>	<b>区内</b>
		ABC	<b>0.274</b>	<b>区内</b>

由表 3 可知, 在不同过渡电阻下, 保护仍可以准确地区分区内外故障, 具有高灵敏性与可靠性。本文所提的保护原理是基于故障分量进行计算, 不受过渡电阻的影响。

### 5.4 噪声对保护性能的影响

电力系统在运行过程中, 通常会受到噪声干扰, 220 kV 线路一般受到不超过信噪比为 25 dB 的噪声影响<sup>[26]</sup>。考虑到噪声对数据采集会产生影响, 进而影响保护的判断。本节在仿真中加入信噪比为 20 dB、25 dB、30 dB、35 dB 的噪声, 分析其对保护性能的影响。图 14 给出不同信噪比下  $f_1$  和  $f_3$  点发生 BC 金属性故障时的  $\mathfrak{J}$  值。

由图 14 可得, 在不同噪声下, 得到的相关性仍趋于稳定, 本文所提方法受噪声的影响较小。

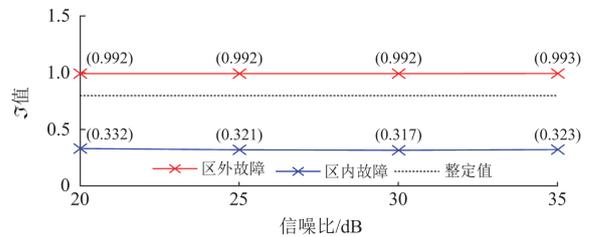


图 14 不同信噪比下  $\mathfrak{J}$  值计算结果

Fig. 14 Calculation results of  $\mathfrak{J}$  values with different signal-to-noise ratio

### 5.5 采样频率对保护性能的影响

由于本文所提保护需探究两组数据集合之间的相关性, 因此分析采样频率对保护性能的影响十分重要。图 15 给出采样频率为 2 kHz、6 kHz、8 kHz 下  $f_3$  和  $f_5$  点发生 A 相金属性接地时的  $\mathfrak{J}$  值。

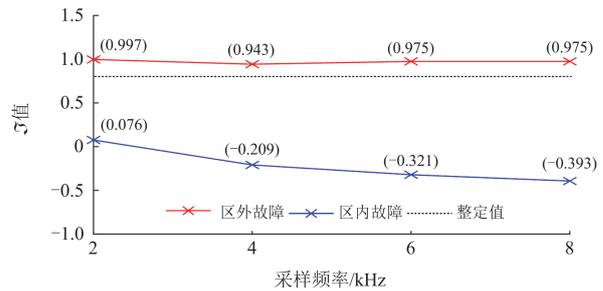


图 15 不同采样频率下  $\mathfrak{J}$  值计算结果

Fig. 15 Calculation results of  $\mathfrak{J}$  values at different sampling frequencies

由图 15 可得, 随着采用频率的增大, 区内故障的计算结果越来越准确, 但区外故障的计算结果几乎无变化。说明采样频率越大, 保护性能越好, 但即使在较低的采样频率下保护仍能正常动作。

## 6 结论

针对海上风电低频输电线路保护存在的问题, 本文提出一种基于差动正序分量波形相似度的保护方法, 得到如下结论。

1) 由于低频输电线路两侧换流器均采用电力电子器件, 导致传统的电流差动保护对单相接地及相间故障存在灵敏性降低甚至拒动的风险。

2) 本文通过提取差动电压与差动电流的正序分量, 利用其波形相关性构成保护判据。

3) 该保护方法不受频率偏移特性、噪声、采样频率的影响, 且具有较好的抗过渡电阻能力, 相较于传统纵联保护, 其灵敏性与可靠性得到大幅提升。

4) 由于采用正序分量进行计算, 需选相配合。

## 参考文献

- [1] 薛帅, 高厚磊, 郭一飞, 等. 大规模海上风电场的双层分布式有功控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 1-9.  
XUE Shuai, GAO Houlei, GUO Yifei, et al. Bi-level distributed active power control for a large-scale wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 1-9.
- [2] 张博宸, 周羽生, 周文晴, 等. 基于滑模观测器的三电平风力发电并网逆变器无差拍优化模型预测控制[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 176-183.  
ZHANG Bochen, ZHOU Yusheng, ZHOU Wenqing, et al. Optimal model predictive control for three-level grid-connected wind power inverters without differential beat based on sliding mode observer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 176-183.
- [3] 陈昌明, 彭克, 陈羽, 等. 直驱风力发电系统接入直流配电系统的小扰动稳定分析[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 57-66.  
CHEN Changming, PENG Ke, CHEN Yu, et al. Small disturbance stability analysis of direct-drive wind power system integrated into DC distribution system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 57-66.
- [4] 林进钿, 倪晓军, 裘鹏. 柔性低频交流输电技术研究综述[J]. 浙江电力, 2021, 40(10): 42-50.  
LIN Jintian, NI Xiaojun, QIU Peng. Review of flexible low frequency AC transmission technology[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10): 42-50.
- [5] LIU S Q, WANG X F, NING L H, et al. Integrating offshore wind power via fractional frequency transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1253-1261.
- [6] 王晨清, 宋国兵, 迟永宁, 等. 风电系统故障特征分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 52-58.  
WANG Chenqing, SONG Guobing, CHI Yongning, et al. Fault characteristics analysis of wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 52-58.
- [7] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20.  
WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 10-20.
- [8] 王峰, 蔡德胜, 於涛, 等. 配电网分布式差动保护数据同步方法[J]. 供用电, 2023, 40(4): 31-38.  
WANG Feng, CAI Desheng, YU Tao, et al. Data alignment method of decentralized current differential protection in distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(4): 31-38.
- [9] 赵勃扬, 王锡凡, 宁联辉, 等. 分频海上风电系统的不对称故障穿越控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4589-4599.  
ZHAO Boyang, WANG Xifan, NING Lianhui, et al. Ride-through control of fractional frequency offshore wind power system during unsymmetrical grid faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4589-4599.
- [10] 顾乔根, 张晓宇, 吕航, 等. 柔性低频输电系统的主变稳态负序差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 168-177.  
GU Qiaogen, ZHANG Xiaoyu, LÜ Hang, et al. Steady state negative sequence differential protection of a transformer in a flexible low-frequency transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 168-177.
- [11] 张树楠, 任军辉, 宋志顺, 等. 基于 M3C 的柔性低频输电系统启动控制策略研究[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 201-209.  
ZHANG Shunan, REN Junhui, SONG Zhishun, et al. Research on startup control strategy of flexible low-frequency transmission system based on M3C[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 201-209.
- [12] 刘乃皓, 高厚磊, 徐彬, 等. 基于电流变化量相似性的海上风电场交流送出线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 65-75.  
LIU Naihao, GAO Houlei, XU Bin, et al. Pilot protection for an AC transmission line of an offshore wind farm based on similarity of current variation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 65-75.
- [13] 蒋嘉桁, 张晨浩, 宋国兵, 等. 电流差动保护在海上风电低频送出线路中的适应性分析[J]. 电力系统自动化,

2024, 48(1): 131-139.  
 JIANG Jiahuan, ZHANG Chenhao, SONG Guobing, et al. Adaptability analysis of current differential protection in offshore wind power low-frequency transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 131-139.

[14] 黄涛, 文继锋, 赵青春, 等. 基于等效序阻抗差异特征的低频输电线路差动保护优化方案[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(5): 143-150.  
 HUANG Tao, WEN Jifeng, ZHAO Qingchun, et al. Optimization scheme for differential protection of low frequency transmission line based on equivalent sequence impedance difference characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(5): 143-150.

[15] 鲁月华, 樊艳芳, 罗瑞. 适用于交直流混联系统的时域全量故障模型判别纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 81-88.  
 LU Yuehua, FAN Yanfang, LUO Rui. Principle of active distribution network pilot protection based on time domain model identification[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 81-88.

[16] 何维轩, 樊征臻, 霍姚彤, 等. 基于交叉熵的海上风电经柔性低频送出系统海缆纵联保护[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 38-48.  
 HE Weixuan, FAN Zhengzhen, HUO Yaotong, et al. Cross-entropy-based offshore wind power longitudinal protection by submarine cable in flexible low-frequency transmission system[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 38-48.

[17] 郑涛, 康恒. 基于控保协同的柔性低频输电系统电流差动保护性能提升方案[J/OL]. 电工技术学报: 1-15 [2025-01-13]. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240202.  
 ZHENG Tao, KANG Heng. Improvement of current differential protection performance of flexible low-frequency transmission system based on control and protection cooperation[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-15[2025-01-13]. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240202.

[18] 风电场接入电力系统技术规定第 1 部分: 陆上风电: GB/T19963.1—2021[S].

[19] 齐金玲, 李卫星, 晁璞璞, 等. 直驱风机故障穿越全过程的通用电磁暂态建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1428-1443.  
 QI Jinling, LI Weixing, CHAO Pupu, et al. Generic electromagnetic transient modeling method for complete fault ride-through processes of direct-driven wind turbine generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1428-1443.

[20] ZHENG L M, JIA K, BI T S, et al. Cosine similarity based line protection for large-scale wind farms[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(7): 5990-5999.

[21] 孟永庆, 王健, 李磊, 等. 基于双 dq 坐标变换的 M3C 变换器的数学模型及控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4702-4712.  
 MENG Yongqing, WANG Jian, LI Lei, et al. Research on modeling and control strategy of modular multilevel matrix converter based on double dq coordinate transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4702-4712.

[22] 何仰赞. 电力系统分析[M]. 4 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016.

[23] 高淑萍, 蔚坤, 宋国兵, 等. 适用于双馈风电场送出线的纵联方向保护研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 218-225.  
 GAO Shuping, YU Kun, SONG Guobing, et al. Research on pilot direction protection suitable for doubly-fed wind farm outgoing line[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2024, 45(1): 218-225.

[24] 王晨清, 宋国兵, 徐海洋, 等. 适用于风电接入系统的相电压暂态量时域选相新原理[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2320-2326.  
 WANG Chenqing, SONG Guobing, XU Haiyang, et al. Novel principle of phase selection for wind power integration based on fault transient voltage in time-domain[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2320-2326.

[25] 廖志刚, 何世恩, 董新洲, 等. 提高大规模风电接纳及送出的系统保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 41-46.  
 LIAO Zhigang, HE Shien, DONG Xinzhou, et al. Research on system protection for improving large-scale wind power acceptance and delivery[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 41-46.

[26] 缪维颖. 海上风电场集电系统稳态故障特征与保护适应性研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.  
 MIAO Weiyong. Study on steady-state fault characteristics and protection adaptability of offshore wind farm collection system[D]. Jinan: Shandong University, 2021.

收稿日期: 2024-09-05; 修回日期: 2025-01-21

作者简介:

高淑萍(1970—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为柔性直流继电保护与新能源并网关键技术等; E-mail: gao.sp2003@163.com

周永宁(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为海上低频输电系统继电保护新原理. E-mail: 909528495@qq.com

(编辑 许威)