编 者 按

近年来，我国以风电和光伏为代表的新能源发电持续快速增长，导致电力系统中的电源结构发生深刻变化。受控制系统作用的影响，新能源电源故障特性与传统同步发电机相比存在显著差异，暂态过程复杂，新能源送出线路的距离保护性能受到全面挑战，保护存在误动和拒动的风险，严重影响故障的准确识别与快速隔离。距离保护的动作性能与系统功角、故障电阻、系统等值阻抗、故障类型等因素相关，由于多种影响因素相互交织，如何准确分析新能源电源控制响应对距离保护动作性能的影响是继电保护专业近年来关注的热点和难点。针对此问题，我国的继电保护工作者开展了大量富有成效的理论研究、仿真验证和装置性能验证工作，为新能源送出线路的保护配置及整定提供了参考依据。《电网技术》本期特约专稿特别推出“新能源电源控制故障响应对交流线路距离保护影响分析”一文，希望能为广大读者提供有益的启迪与参考。

文章编号：1000-3673（2024）09-3834-10　　**中图分类号：**TM 721　　**文献标志码：**A　　**学科代码：**470·40

新能源电源控制故障响应对交流线路距离保护影响分析

王兴国[1]，于溯[1]，周泽昕[1]，柳焕章[2]
（1. 电网安全全国重点实验室(中国电力科学研究院有限公司)，北京市 海淀区 100192；
2. 国家电网有限公司华中分部，湖北省 武汉市 430077）

Action Analysis of AC Line Distance Protection Considering New Energy Power Control Response

WANG Xingguo[1], YU Su[1], ZHOU Zexin[1], LIU Huanzhang[2]
(1. State Key Laboratory of Power Grid Safety (China Electric Power Research Institute), Haidian District, Beijing 100192, China;
2. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The AC transmission system sends out large-scale wind and photovoltaic power. When a fault occurs in the transmission line, the malfunction response of the renewable energy power control severely affects the operation performance of the distance protection of the AC line. This paper analyzes the impact of typical renewable energy power control strategies on equivalent impedance and system power angle after a fault, which significantly increases the equivalent impedance and system power angle after the fault. Further research is conducted on the operation performance of different types of distance protection. For impedance-based distanceprot ection, it is revealed that protection misoperation occurs when a fault with resistance occurs outside the zone, and protection operation rejection occurs when an internal fault occurs. For phase comparison distance protection, it is revealed that controlled offset of positive sequence polarizing voltage leads to protection operation rejection when a phase-to-phase short circuit fault occurs within the zone and protection misoperation when a fault occurs outside the zone in the reverse direction. A simulation model is established using the RTDS (Real Time Digital Simulation System), and the theoretical analysis is verified using simulation results and actual misoperation data from the field, providing a theoretical basis for fault analysis and backup protection configuration of large-scale renewable energy transmission lines.

KEY WORDS: new energy power control response; impedance measuring distance protection; phase comparison distance protection; equivalent impedance; system power angle; refuse operation; mis-operation

基金项目：国家自然科学基金项目(U2166205)。
Project Supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U2166205).

摘要：大规模风电、光伏新能源经交流送出系统中，送出线路发生故障后，新能源电源控制的故障响应严重影响交流线路距离保护的动作性能。该文分析了新能源电源典型控制策略对故障后电源等值阻抗及系统功角的影响，故障后电源等值阻抗和系统功角显著增大。进一步研究了不同类型距离保护的动作性能。针对测距式距离保护，揭示了线路正向区外或反向区外发生经过渡电阻故障时保护误动、线路正向区内故障时保护拒动机理。针对比相式距离保护，揭示了正序极化电压相位受控偏移导致线路区内相间短路故障时保护拒动、区外反向故障时保护误动机理。利用实时数字仿真平台(real time digital simulation system，RTDS)建立了仿真模型，利用仿真结果和现场实际误动数据验证了理论分析的正确性，为大规模新能源送出线路故障分析和后备保护配置提供了理论依据。

关键词：新能源电源控制策略；测距式距离保护；比相式距离保护；等值阻抗；系统功角；保护误动；保护拒动

DOI：10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1677

0　引言

近年来，我国风电、光伏新能源装机规模及发电量快速增长，新能源发电在总发电量的占比持续增加。大规模新能源经交流送出系统中，当交流送出线路发生故障时，新能源电源提供的短路电流受其控制策略影响，与常规电源相比，短路电流幅值显著降低，其中，负序电流抑制策略会减小线路不对称故障时的负序电流分量，低电压穿越策略会减小故障后的正序电流，新能源电源在交流线路故障后呈现典型弱电源特征[1]。

距离保护作为交流输电线路最重要的后备保护在国内外电网得到广泛应用，由于实现方式不同，可分为测距式距离保护和比相式距离保护[2]，对于新能源送出线路，受控制响应影响，距离保护的动作性能大幅下降，甚至会发生拒动和误动[3]。

国内外学者针对新能源故障特征对距离保护的影响分析，集中在利用数字仿真分析过渡电阻对保护灵敏性的影响[4-13]：文献[4]分析了新能源送出线阻抗距离继电器的动作行为，仿真结果表明线路区内发生经过渡电阻故障时保护会拒动。文献[5]分析了风电经交流线路接入柔直系统，线路区内经电阻故障情况下距离继电器性能下降，存在拒动风险。文献[6]利用 RTDS 实时数字仿真平台，验证了柔直受端交流线路区内经过渡电阻故障情况下阻抗距离继电器存在不正确动作的问题。文献[7]分析了风场送出线路正序电压极化距离保护的动作行为，指出新能源电源等值阻抗特性改变，距离保护存在不正确动作风险。以上分析主要采用仿真手段研究了过渡电阻对新能源送出线路距离保护性能的影响。文献[8]分析了新能源经柔直送出场景下比相式距离保护不正确动作机理。

针对新能源送出线路保护新原理，国内外学者也开展了相应的研究[14-21]。文献[14]提出了高频突变量距离保护原理，通过比较高频工作电压与故障点高频电压的大小确定区内外故障，文献[15]提出了基于线路区内外故障时电流行波高低频带能量差异构造保护判据，文献[16]基于 R-L 模型中的计算结果设置整定点，并利用贝瑞隆模型中计算整定点处的电气量，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。

本文重点研究了新能源电源经交流送出场景下，新能源低压穿越策略、负序电流抑制策略对等值电源阻抗和系统功角的影响，交流线路故障后，新能源电源等值阻抗及系统功角显著增大。揭示了测距式和比相式两种不同类型的距离保护受新能源电源控制影响导致不正确动作的机理，对于测距式距离保护，电源等值阻抗、系统功角增大，与过渡电阻综合作用，改变测量阻抗的幅值与相位，导致保护在区内故障时存在拒动风险和区外故障时存在误动风险；对于正序极化电压比相式距离保护，电源等值阻抗、系统功角增大改变了极化电压的相位，使其无法反映故障前的保护安装处的电压相位特征，导致保护不正确动作。

利用实时数字仿真系统(real time digital simulation system，RTDS)建立了新能源经交流送出系统的仿真模型，仿真验证了送出线路故障后电源等值阻抗、系统功角的特征及两种距离保护(测距式与比相式)的动作性能，受新能源电源控制影响，两种距离保护均存在误动和拒动情况，并结合现场保护误动数据进行回放，试验结果与理论分析结果一致，为新能源送出线路保护故障分析和后备保护配置提供了理论依据。

1　影响距离保护动作性能的主要因素

距离保护利用保护安装处的测量电流和测量电压确定故障点位置，具体实现方式可分为测距式距离保护和比相式距离保护，影响距离保护的因素主要包括等值电源阻抗、系统功角和过渡电阻。

1.1　测距式距离保护

结合图 1 所示故障系统示意图，分析电源等值阻抗、系统功角和过渡电阻对测距式距离保护的影响。图中 Z_S、Z_L、Z_Q 分别为等值电源 S 的阻抗、线路全长阻抗和系统 Q 的等值阻抗，Z_{FM} 和 Z_{FN} 分别为故障点 F1 与到母线 M、N 之间的线路正序

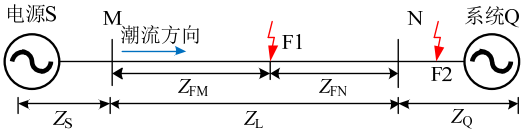

图 1 故障系统示意图

Fig. 1 Fault system diagram

阻抗。

F1 点故障后，M 侧距离保护的测量阻抗 Z 为

$$Z = Z_{FM} + Z_R \tag{1}$$

式中 Z_R 为故障电阻 R 上的附加阻抗。

$$Z_R = \frac{Z_{FN}\dot{E}_S + Z_{FM}\dot{E}_Q}{\dot{E}_S - \dot{E}_Q}\{1-[1/(1+\frac{\dot{E}_S-\dot{E}_Q}{Z_{FQ}\dot{E}_S}R)]\} \tag{2}$$

式中 $\dot{E}_S$、$\dot{E}_Q$ 分别为电源 S 与系统 Q 电势。

综合式(1)和(2)，Z 与系统功角δ($\dot{E}_S$ 与 $\dot{E}_Q$ 之间的夹角)、Z_S、R 相关，在阻抗平面上，如图 2 所示，当 R=0 时，Z_R=0。当 R=∞时，$\frac{Z_{FN}\dot{E}_S + Z_{FM}\dot{E}_Q}{\dot{E}_S - \dot{E}_Q}$。

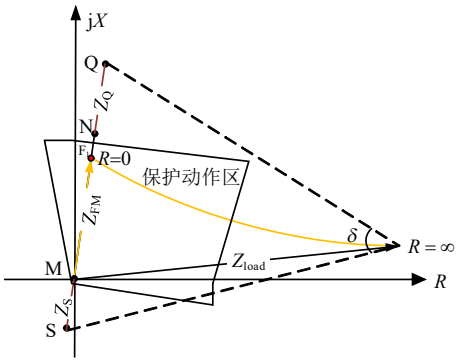

图 2 测量阻抗与δ、Z_S、R 之间关系

Fig. 2 Relation of Z and δ、Z_S、R

1.2 比相式距离保护

比相式距离保护判据为

$$90^\circ \le \arg\frac{\dot{U} - \dot{I}Z_{set}}{\dot{U}_J} \le 270^\circ \tag{3}$$

式中：对于相间距离保护，$\dot{U} = \dot{U}_{ij}$，$\dot{I} = \dot{I}_{ij}$ (ij=AB、BC、CA)，对于接地距离保护，$\dot{U} = \dot{U}_i$，$\dot{I} = \dot{I}_i + 3k\dot{I}_0$，($i$=A、B、C，$k$=($Z_0$–$Z_1$)/3$Z_1$)，其中 Z_0、Z_1 分别为单位长度线路零序和正序阻抗，Z_{set} 为整定阻抗；$\dot{U}_J$ 为极化电压，为了消除线路出口故障时保护的动作死区，一般采用正序电压$\dot{U}_1$。

图 1 中 F1 点故障时，比相式距离保护动作特征在电压平面上如图 3 所示，图中 $\dot{U}_{M[0]}$ 为故障前保护安装处的电压，$\dot{U}_1$ 相位与δ、Z_S 相关，当δ>90°时，弱馈侧(Z_S 较大)距离保护存在拒动风险[8]。

2 新能源电源控制故障响应下故障电气特征分析

针对风电、光伏新能源电源，选取两种典型的

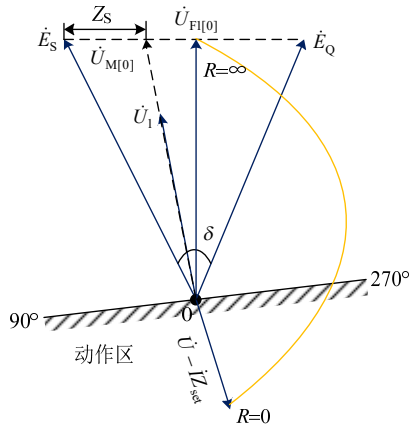

图 3 比相式距离保护动作特性

Fig. 3 Characteristics of phase comparison distance protection

控制策略(低电压穿越策略和负序电流抑制策略)进行分析。

2.1 典型故障控制策略

1）低电压穿越策略。

交流系统故障后，新能源电源采取正、负序独立解耦控制的低压穿越策略，其中基于正序分量的低电压穿越控制目标是正常运行状态下保证直流侧电容电压恒定及单位功率因数运行，交流侧故障时切换至低电压穿越控制以提供无功电流支持电网电压。基于负序分量的负序电流控制目标是控制电网负序电流为零，实现网侧变换器电流平衡，以满足电网电压不平衡下并网电流无负序电流仍保持对称的要求。当并网点电压发生跌落后，检测并网点正序电压跌落幅度，根据电压跌落程度确定 dq 轴电流参考值。根据换流器的耐受短路电流能力，实现外界故障后输出的故障电流不超过额定电流的 1.2 倍。低电压穿越策略逻辑如图 4 所示，图中上标“+”表示正序分量，下标“ref”表示参考量，$i_{d\mathrm{ref}}^{+}$、$i_{q\mathrm{ref}}^{+}$ 分别为给定的负序 d、q 轴正序电流参考量，i_d^{+}、i_q^{+} 分别为 d、q 轴正序电流，u_d^{+}、u_q^{+} 分别为 d、q 轴正序电压，e_α^{+}、e_β^{+} 为输出α、β轴正序电压。

低压穿越过程中的公共并网点电压 u_{pcc} 与 dq

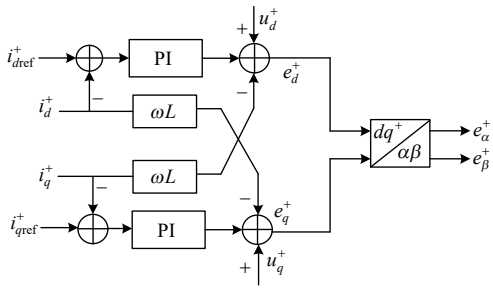

图 4 低压穿越策略逻辑图

Fig. 4 Logic diagram of low voltage ride through

轴电流 i_d^+、i_q^+ 之间的关系如下所示：

$$\begin{cases} i_q^+ = 0 \\ i_d^+ = i_{d|0|} \end{cases}, \quad u_{\mathrm{pcc}} \geq 0.9$$

$$\begin{cases} i_q^+ = 1.5 \times (0.9 - u_{\mathrm{pcc}}) \\ i_d^+ = \min(i_{d|0|}, \sqrt{1.2^2 - (i_q^+)^2}) \end{cases}, \quad 0.1 < u_{\mathrm{pcc}} < 0.9 \quad (4)$$

$$\begin{cases} i_q^+ = 1.2 \\ i_d^+ = 0 \end{cases}, \quad u_{\mathrm{pcc}} \leq 0.1$$

式中 $i_{d|0|}$为正常运行期间的 i_d 值。

2）负序电流抑制策略。

图 5 为内环电流控制器的负序电流控制方案，其中上标“–”表示负序分量，$i_{d\mathrm{ref}}^-$、$i_{q\mathrm{ref}}^-$ 分别为给定的负序 d、q 轴正序电流参考量，一般为 0，i_d^-、i_q^- 分别为 d、q 轴负序电流，u_d^-、u_q^- 分别为 d、q 轴负序电压，e_α^-、e_β^- 为输出α、β轴负序电压。可见，交流线路故障后，新能源电源提供的负序电流为 0，但是负序电压不为 0。

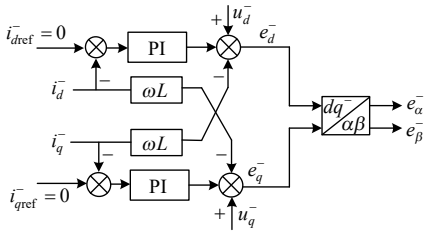

图 5　负序电流抑制策略控制框图

Fig. 5　Logic diagram of negative sequence current suppression

2.2　典型故障特征

新能源送出线路故障后，电气特征受新能源电源控制故障响应的影响，针对影响距离保护动作性能的因素，重点分析电压、电流、电源等值阻抗、系统功角的影响。

1）测量电压和测量电流。

根据 2.1 节分析，新能源送出线路故障后，新能源电源提供的短路电流中负序电流被抑制，正序电流的幅值受限，相比常规交流电源，故障电流的幅值减小，但零序分量不受新能源电源控制影响。

图 6 为线路发生单相接地故障(以 A 相接地故障为例)时，常规交流电源与新能源电源提供的故障电流和电压，可见，图 6(a)中新能源侧相电流中主要为零序电流 $\dot{I}_0$；图 6(b)中，与常规交流电源相比，新能源电源提供的正序电流 $\dot{I}_1$ 幅值大幅减小，负序电流 $\dot{I}_2$ 幅值接近 0，零序电流 $\dot{I}_0$ 不受影响；图 6(c)中，新能源侧的正、负、零序电压($\dot{U}_1$、$\dot{U}_2$、$\dot{U}_0$)与常规交流电源相同。

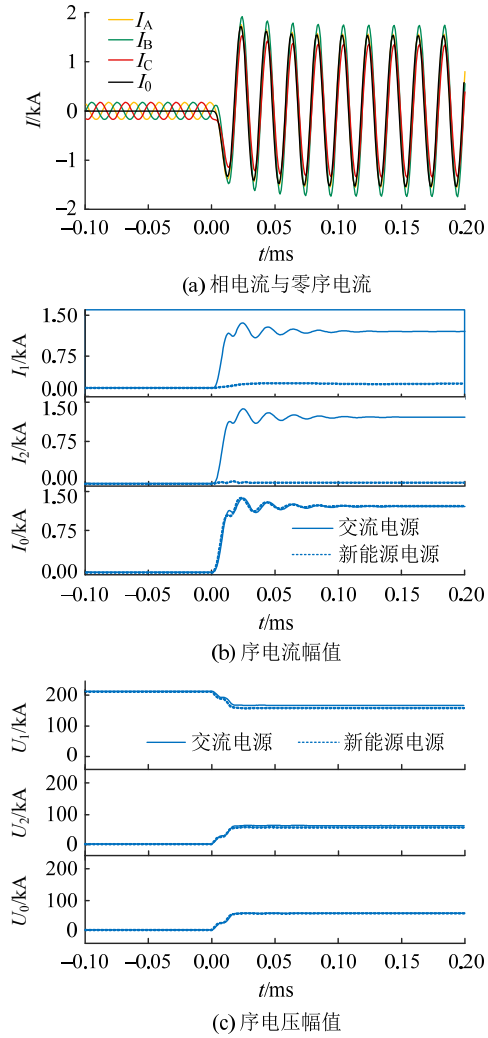

图 6　单相接地故障新能源侧故障电气量特征

Fig. 6　Fault electrical characteristics of new energy power side for single-phase-to-ground fault of line

2）电源等值阻抗。

新能源送出线路故障后，新能源电源可以用理想电压源与等值阻抗串联形式进行等值。按照 1.1 节分析方法，设新能源电源等值阻抗 Z_{S} 与线路阻抗角 Z_{L} 相同，线路两侧电源内电势 $\dot{E}_{\mathrm{S}}$ 和 $\dot{E}_{\mathrm{Q}}$ 幅值相同。利用线路保护安装处的电压和电流可以计算出 Z_{S}。正常运行时，Z_{S} 与新能源送出的功率有关。交流系统故障后，新能源电源受低压穿越控制策略影响，提供的短路电流幅值受限，呈现弱交流电源系统特征，故障后 Z_{S} 显著增大且故障前后差异显著。

图 7 为不同类型故障前后 Z_{S} 的幅值曲线，可见两相短路故障前后，Z_{S} 幅值变化大，相差 3 倍。单相接地故障时，Z_{S} 幅值变化小。

3）系统功角。

正常运行时，新能源电源 S 与系统 Q 之间的功角δ与潮流大小相关。交流系统故障后，δ与 Z_{S}、保护安装处的测量电压 $\dot{U}_{\mathrm{M}}$、测量电流 $\dot{I}_{\mathrm{M}}$ 相关。故障

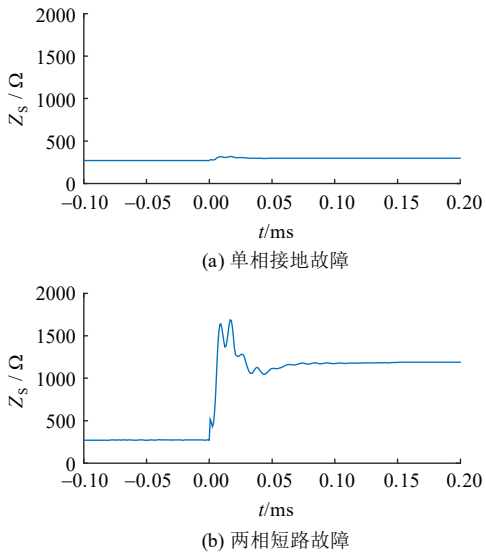

图 7　不同类型故障前后新能源电源阻抗幅值

Fig. 7　Impedance of new energy equivalent power for different fault types of line

前后，δ的变化如图 8 所示，图中，故障前，δ较小；故障后，受控制策略影响，Z_S 快速增大，进而导致δ增大。

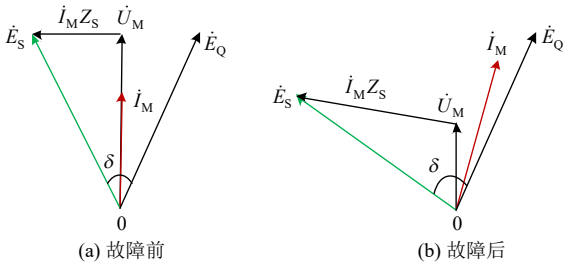

图 8　交流线路故障前后系统功角特性

Fig. 8　Power angle before and after AC line fault

图 9 为不同类型故障前后δ的变化曲线，单相接地故障前后δ变化较小；两相短路故障后δ快速增大，接近 90°。

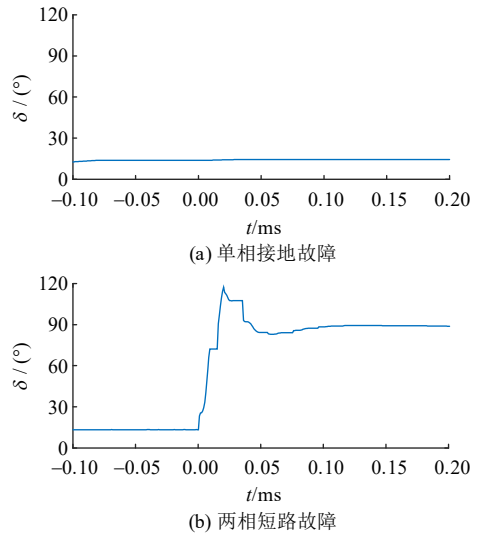

图 9　不同类型故障前后系统功角特征

Fig. 9　Power angle before and after AC line fault for different fault types

3　新能源电源控制故障响应下距离保护动作行为分析

3.1　测距式距离保护

结合 1.1 节及 2.2 节分析结果，新能源送出线路故障后，受控制响应影响，Z_S 和δ会增大，测距式距离保护动作性能与过渡电阻和故障类型密切相关。

1）过渡电阻。

对于金属性故障(过渡电阻为 0)，故障点处接地故障相电压为 0，两相短路时故障相间电压差为 0，测量阻抗 Z 正确反映故障点到保护安装处的线路阻抗，此时，测距式距离保护性能不受新能源控制影响。

过渡电阻不为 0 时，图 10 为 F1 点发生经过渡电阻故障时的测量阻抗，图中蓝线为正常运行时的测量阻抗 Z，红线为故障后的 Z 随过渡电阻 R 的轨迹。可见，受新能源控制影响，Z_S 和δ增大，随着 R 增大，Z 从第 I 象限向第 IV 象限偏移，即区内故障时，随着 R 增大，Z 会处于动作区之外，距离保护会拒动。同理，区外故障时，随着 R 增大，Z 会进入动作区，距离保护会误动。

2）故障类型。

根据 2.2 节分析，新能源交流送出线路发生相间经过渡电阻短路故障时，故障前后 Z_S 和δ变化显著，相间距离保护存在区内拒动和区外误动的风险(如图 10 所示)。线路发生两相经过渡电阻接地故障时，相间距离保护的性能与相间经过渡电阻短路故障时类似。

线路发生接地故障时，零序分量不受新能源控制响应影响，且故障前后 Z_S 和δ变化小，接地距离保护性能不受影响。

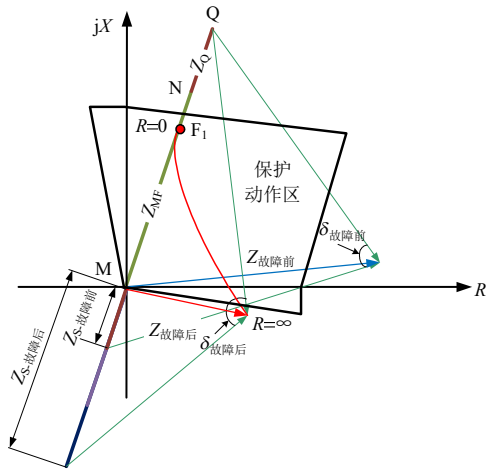

图 10　新能源送出线路测量阻抗变化轨迹

Fig. 10　Measuring impedance trajectory of new energy equivalent power transmission line

3.2　比相式距离保护

正序极化电压比相式距离保护的动作性能受极化电压$\dot{U}_1$相位影响，$\dot{U}_1$的相位与故障类型、Z_S、δ密切相关。

1）故障类型。

正序极化电压比相式距离保护正确动作的功角边界是δ=90°。以图 1 所示系统为例，图 11 为 F1 点故障(区内故障)时 M 侧距离保护拒动机理示意图，图中，$Z_\Sigma=Z_S+Z_L+Z_Q$ 可见，当δ>90°且 Z_S 较大时，$\dot{U}_1$的相位靠近 $\dot{E}_Q$，相比图 3，保护动作区发生偏移，导致$\dot{U}-\dot{I}Z_{set}$位于动作区之外，距离保护会拒动。图 12 为区外故障(F2)时 N 侧距离保护误动机理示意图，可见，当δ>90°且 Z_S 较大时，保护动作区发生偏移，导致$\dot{U}-\dot{I}Z_{set}$位于动作区之内，距离保护会误动。

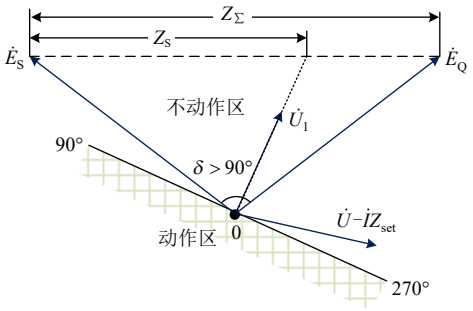

图 11　区内故障比相式距离保护拒动机理

Fig. 11　Refuse operation of phase comparison distance protection for internal faults

结合 2.2 节分析，新能源交流送出线路发生相间短路故障时，故障后 Z_S 和δ显著增大，当δ>90°，线路区内故障时，新能源侧正序极化电压比相式距离保护可能发生拒动；同理，线路区外故障时，正序极化电压比相式距离保护可能发生误动。对于接地故障，故障前后 Z_S 和δ变化小，正序极化电压比相式距离保护正确动作。

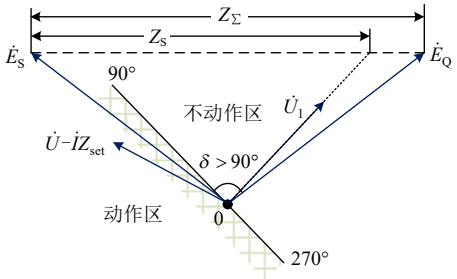

图 12　区外故障比相式距离保护误动机理

Fig. 12　Mis-operation of phase comparison distance protection for external faults

2）故障电阻。

不同于测距式距离保护，新能源送出线路发生金属性相间短路故障时，由于极化电压$\dot{U}_1$的相位偏移，距离保护也会误动或拒动。

图 13 为经过渡电阻故障时，正序电压极化比相式距离保护的动作特性。可见，区内故障时，受新能源电源控制响应影响，Z_S 和δ增大，导致$\dot{U}_1$偏转，保护动作区发生偏移，且偏移方向与过渡电阻导致$\dot{U}-\dot{I}Z_{set}$偏移的方向相反，降低了过渡电阻的识别能力。

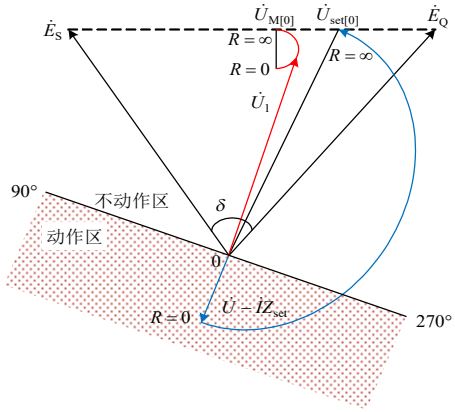

图 13　经过渡电阻故障时比相式距离保护动作区

Fig. 13　Operation zone of phase comparison distance protection for faults with resistances

4　仿真及现场数据验证

4.1　仿真模型

为验证新能源电源控制响应对距离保护的影响并与常规交流电源进行对比分析，利用 RTDS 实时数字仿真平台建立了仿真模型(图 14)，通过转换开关进行状态切换，状态 1 为传统交流电源送出；状态 2 为新能源电源交流送出。仿真系统参数如表 1 所示。

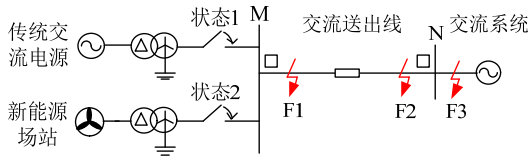

图 14　仿真系统示意图

Fig. 14　Simulation model of bus faults

表 1　仿真系统参数

Table 1　Simulation system parameters

参数	数值
新能源场站容量	50MW
M 侧交流系统容量	50MW
N 侧交流系统容量	300MW
M 侧交流系统阻抗	13.6+j260Ω
N 侧交流系统阻抗	0.75+j15Ω
变压器电压	35kV/230kV
MN 电压等级	220kV
MN 长度	100km
MN 正序阻抗	0.0015+j0.01265Ω/km
MN 零序阻抗	0.0045+j0.037Ω/km
距离保护 I 段整定范围	70%

4.2 测距式距离保护性能验证

1）F1 区内故障。

图 15 为状态 1、2 下，线路 F1 处发生 A 相接地故障时，M 侧保护测量阻抗轨迹，接地距离保护准确计算出保护安装处至故障点处的测量阻抗，距离保护正确动作。

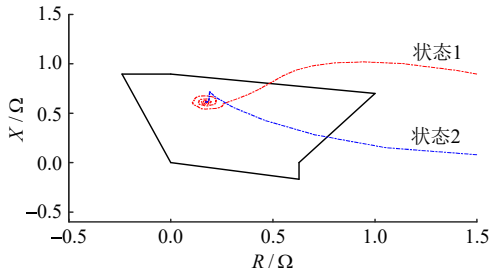

图 15 A 相接地故障时测量阻抗比较

Fig. 15 Measurement impedance of phase-A-to-ground fault at F1

图 16 为状态 2 下，线路 F1 处发生 BC 相短路、BC 相接地时，M 侧保护的测量阻抗。比较图 15 和 16，可得，金属性故障时，距离保护不受新能源控制响应影响，正确动作。

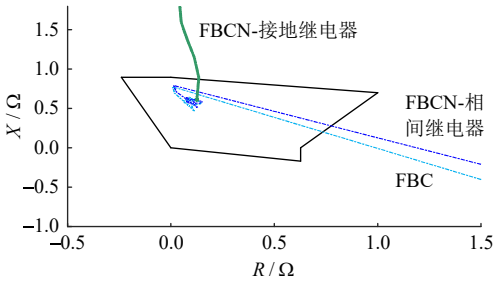

图 16 相间故障时测量阻抗(状态 2)

Fig. 16 Measurement impedance of phase-to-phase faults at F1 in operation condition 2

图 17 为状态 1、2 下，线路 F1 处发生 BC 相经 0.03Ω电阻短路故障时，M 侧保护的测量阻抗轨迹。可见，受新能源电源控制响应影响，测量阻抗处于动作区外，距离保护拒动，过渡电阻识别能力明显低于传统交流电源。

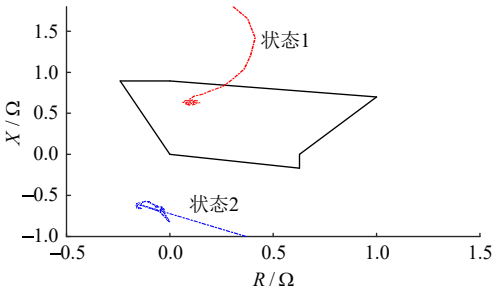

图 17 BC 相经过渡电阻短路故障时测量阻抗

Fig. 17 Measurement impedance of phase-BC-short fault with 0.03Ω resistance at F1

图 18 为状态 1、2 下，线路 F1 处发生 A 相经 20Ω电阻接地故障时，M 侧保护的测量阻抗轨迹。

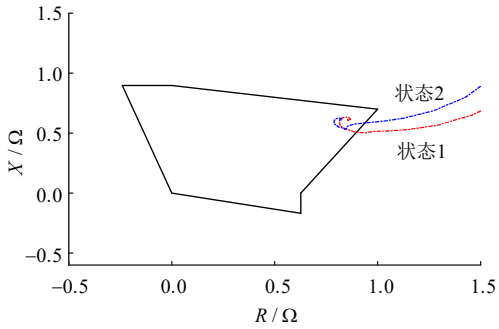

图 18 A 相经过渡电阻接地故障时测量阻抗

Fig. 18 Measurement impedance of phase-A-to-ground fault with 20Ω resistance at F1

可见，单相接地故障时，测量阻抗基本不受新能源电源控制响应影响，距离保护识别过渡电阻能力与传统交流电源相当。

图 19 为状态 1、2 下，线路 F1 处发生 BC 两相经过渡电阻接地故障时(相间电阻为 0.03Ω，接地电阻为 20Ω)，M 侧接地距离保护与相间距离保护的测量阻抗。可见，状态 1、2 下，接地距离保护识别过渡电阻能力相当；状态 2(新能源电源)下相间距离保护的测量阻抗位于动作区外，保护拒动，识别过渡电阻能力明显低于状态 1(传统交流电源)。

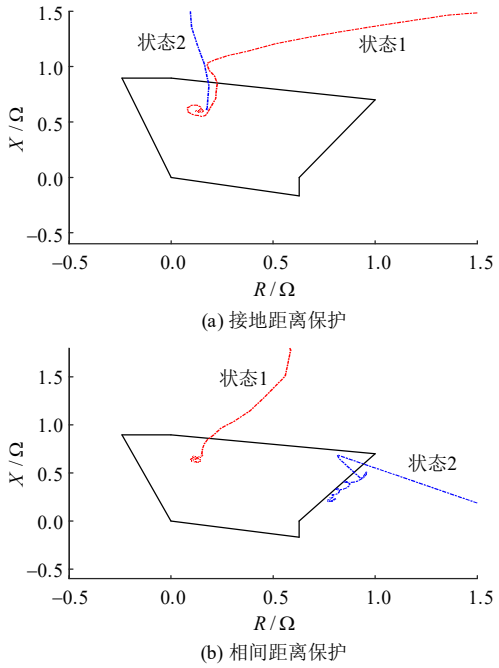

图 19 BC 相经过渡电阻接地故障时测量阻抗轨迹

Fig. 19 Measurement impedance of phase-BC-to-ground fault with fault resistance at F1

2）F2 正向区外故障。

图 20 为状态 1、2 下，线路 F2 处发生 BC 相经 0.03Ω过渡电阻短路故障时，M 侧保护的测量阻抗轨迹。可见，状态 2(新能源电源)下，测量阻抗进入保护动作区，保护误动；状态 1(传统交流电源)下，距离保护可靠不动作。

3）F3 反向区外故障。

图 21 为状态 1、2 下，线路 F3 处发生 BC 相经 0.03Ω过渡电阻短路故障时，N 侧保护的测量阻抗轨迹。可见，状态 2(新能源电源)下，测量阻抗进入保护动作区，保护误动；状态 1(传统交流电源)下，距离保护可靠不动作。

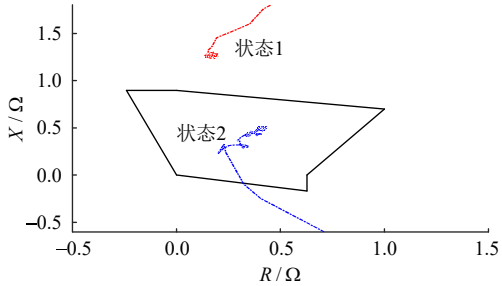

图 20　正向区外 BC 相短路故障时测量阻抗

Fig. 20　Measurement impedance of phase-BC-short fault with fault resistance at F2

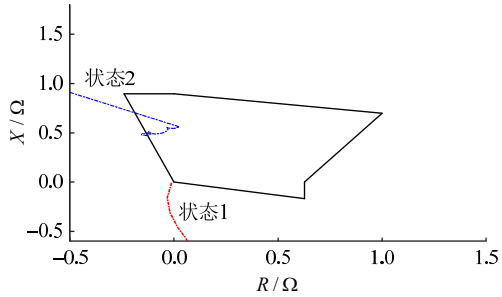

图 21　反向区外 BC 相短路故障时 Z_{BC} 轨迹比较

Fig. 21　Measurement impedance of phase-BC-short fault with fault resistance at F3

4）现场数据。

图 22 为某 110kV 新能源送出线路反向区外发生 BC 相间短路时，故障期间距离保护的测量阻抗轨迹，由图可得，受新能源电源控制故障响应影响，导致测量阻抗进入动作区，保护误动。

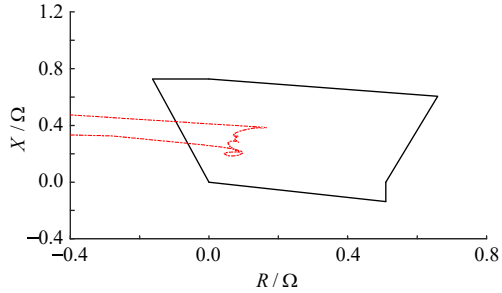

图 22　现场线路反向区外 BC 相间短路时测量阻抗

Fig. 22　Measurement impedance of backward phase-BC-short fault in field operation

4.3　比相式距离保护性能验证

1）F1 区内故障。

图 23 为状态 1、2 下，线路 F1 处发生 A 相接地故障时，M 侧正序极化电压比相式距离保护的动作行为，图中，纵坐标θ为$\dot{U}-\dot{I}Z_{set}$与$\dot{U}_1$之间的夹角，可见，状态 1、2 下，正序极化电压比相式接地距离保护均正确动作。

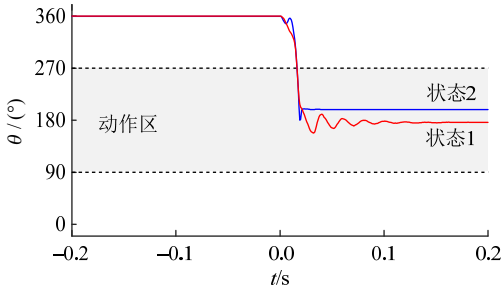

图 23　A 相接地故障比相式距离保护动作结果

Fig. 23　Phase comparison distance protection of phase-A-to-ground fault at F1

图 24 为状态 1、2 下，线路 F1 处发生 BC 相短路故障时，M 侧正序极化电压比相式距离保护的动作行为。可见，状态 2 下，受新能源电源控制响应影响，正序极化电压比相式相间距离保护处于动作边界，存在拒动风险。

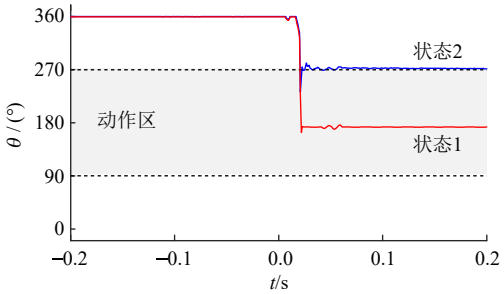

图 24　BC 相短路比相式距离保护动作结果

Fig. 24　Phase comparison distance protection of phase-BC-short fault at F1

图 25 为状态 1、2 下，线路 F1 处发生 A 相经 20Ω过渡电阻接地故障时，M 侧正序极化电压比相式距离保护的动作行为。可见，状态 1、2 下，比相式接地距离保护识别过渡电阻能力相当。

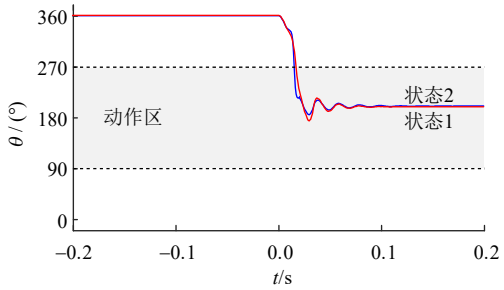

图 25　A 相经过渡电阻接地故障比相式距离保护动作结果

Fig. 25　Phase comparison distance protection of phase-A-to-ground fault with 20Ω resistance at F1

图 26 为状态 1、2 下，线路 F1 处发生 BC 相经 20Ω过渡电阻接地故障时，M 侧正序极化电压比相式距离保护的动作行为。可见，状态 2(新能源电源)下相间距离保护会拒动，过渡电阻识别能力明显低于状态 1(传统交流电源)。

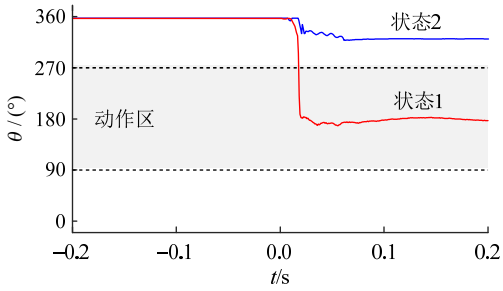

图 26　BC 相经过渡电阻接地故障比相式距离保护动作结果

Fig. 26　Phase comparison distance protection for phase-BC-to-ground fault with fault resistance at F1

2）F3 反向区外故障。

图 27 为状态 1、2 下，线路 F3 处发生 BC 相短路故障时，N 侧正序极化电压比相式距离保护的动作行为。由图可见，受新能源电源控制响应影响，状态 2(新能源电源)下相间距离保护会误动；状态 1(传统交流电源)下相间距离保护可靠不动作。

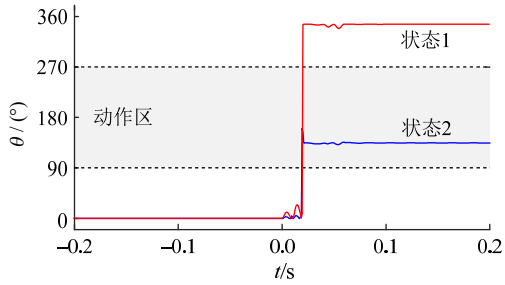

图 27　区外 BC 相短路故障比相式距离保护动作结果

Fig. 27　Phase comparison distance protection for transmission line phase-BC-short fault at F3

3）现场数据。

图 28 为某 110kV 新能源送出线路反向区外发生 BC 相间短路时，正序极化电压比相式距离保护的动作行为，由图可见，受新能源电源控制故障响应影响，正序极化电压比相式距离保护误动。

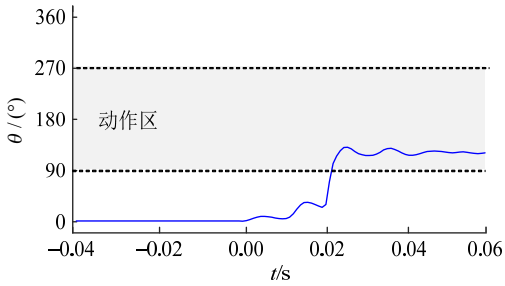

图 28　现场线路反向 BC 相短路比相式距离保护动作结果

Fig. 28　Phase comparison distance protection for backward phase-BC-short fault in field operation

5　结论

风电、光伏新能源的交流送出线路发生故障后，受新能源电源控制响应影响，新能源电源的故障电流幅值减小，负序电流被抑制，等值电源阻抗和系统功角增大，进而影响距离保护的动作性能。

1）对于测距式距离保护，当线路发生经故障电阻的故障时，区内故障保护会拒动，区外故障时保护会误动。线路发生经故障电阻的接地故障时接地距离保护识别故障电阻能力大幅下降。

2）对于正序极化电压比相式距离保护，系统功角增大会导致线路新能源侧的正序极化电压发生相位偏转，进而当线路发生区内金属性相间故障时保护会拒动，区外金属性相间故障时保护会误动；线路发生经故障电阻的接地故障时接地距离保护识别故障电阻能力大幅下降。

现有距离保护无法适应新能源送出场景，需要研究适用于新能源交流送出线路的后备保护原理。

参考文献

[1] 全国电力监管标准化技术委员会．风电场接入电力系统技术规定：GB/T 19963—2011[S]．北京：中国标准出版社，2012．

[2] 王梅义．距离继电器动作行为的分析[J]．继电器，1979(4)：1-65．
WANG Meiyi．Analyze the operation characteristic of impedance relay[J]．Relay，1979(4)：1-65(in Chinese)．

[3] 孙华东，许涛，郭强，等．英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]．中国电机工程学报，2019，39(21)：6183-6191．
SUN Huadong，XU Tao，GUO Qiang，et al．Analysis on blackout in great Britain power grid on August 9th，2019 and its enlightenment to power grid in China[J]．Proceedings of the CSEE，2019，39(21)：6183-6191(in Chinese)．

[4] 李彦宾，贾科，毕天姝，等．逆变型电源对距离保护的影响机理分析[J]．电力系统保护与控制，2018，46(16)：54-59．
LI Yanbin，JIA Ke，BI Tianshu，et al．Impact of inverter-interfaced renewable energy generators on distance protection[J]．Power System Protection and Control，2018，46(16)：54-59(in Chinese)．

[5] 郑黎明，贾科，毕天姝，等．海上风电接入柔直系统交流侧故障特征及对保护的影响分析[J]．电力系统保护与控制，2021，49(20)：20-32．
ZHENG Liming，JIA Ke，BI Tianshu，et al．AC-side fault analysis of a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms and the impact on protection[J]．Power System Protection and Control，2021，49(20)：20-32(in Chinese)．

[6] 高媛．交直流混联配电网的继电保护适用性分析[D]．呼和浩特：内蒙古工业大学，2021．
GAO Yuan．Analysis of relay protection applicability of AC-DC hybrid distribution network[D]．Hohhot：Inner Mongolia University of Technology，2021(in Chinese)．

[7] 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(in Chinese)．

[8] 周泽昕，于溯，李勇，等．新能源经柔直送出场景下功角变化导致比相式距离保护不正确动作机制分析[J]．中国电机工程学报，2023，43(5)：1730-1738．
ZHOU Zexin，YU Su，LI Yong，et al．Analysis of the incorrect operation mechanism of the phase comparison distance protection

caused by the change of power angle in the scenario of MMC-HVDC connected renewable power system[J]. Proceedings of the CSEE，2023，43(5)：1730-1738(in Chinese).

[9] 张延林，马磊，王杰，等．新能源电源接入风电场的距离保护及差动保护评估[J]．光源与照明，2022(3)：210-212.
ZHANG Yanlin，MA Lei，WANG Jie，et al. Distance protection and differential protection evaluation of new energy power to wind farm[J]. Lamps & Lighting，2022(3)：210-212(in Chinese).

[10] 彭放，高厚磊，郭一飞，等．构网逆变电源故障穿越控制策略及其对保护影响的研究综述[J/OL]．电网技术，2024：1-15[2024-07-21]．https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1308.
PENG Fang，GAO Houlei，GUO Yifei，et al. A review of fault ride-through control strategies of grid-forming inverter-based resources and the influence on protection[J/OL]. Power System Technology，2024：1-15[2024-07-21]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1308(in Chinese).

[11] 黄涛，陆于平，凌启程，等．撬棒电路对风电场侧联络线距离保护的影响及对策[J]．电力系统自动化，2013，37(17)：30-36.
HUANG Tao，LU Yuping，LING Qicheng，et al. Impact of crowbar on wind farm side interconnection line distance protection and mitigation method[J]. Automation of Electric Power Systems，2013，37(17)：30-36(in Chinese).

[12] JIA Ke，CHEN Rui，XUAN Zhenwen，et al. Fault characteristics and protection adaptability analysis in VSC-HVDC-connected offshore wind farm integration system[J]. IET Renewable Power Generation，2018，12(13)：1547-1554.

[13] 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(in Chinese).

[14] 贾科，杨哲，赵其娟，等．适用于新能源场站送出线路的高频突变量距离保护[J]．电网技术，2019，43(9)：3271-3279.
JIA Ke，YANG Zhe，ZHAO Qijuan，et al. High-frequency fault component based distance protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J]. Power System Technology，2019，43(9)：3271-3279(in Chinese).

[15] 吴宇奇，黎钊，肖澍昱，等．超高压输电线路单端暂态量欠范围式保护方案[J]．中国电机工程学报，2022，42(S1)：70-81.
WU Yuqi，LI Zhao，XIAO Shuyu，et al. The non-unit transient-based underreach protection for EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE，2022，42(S1)：70-81(in Chinese).

[16] 桂小智，宋国兵，常鹏，等．适用于新能源并网系统的距离保护方法[J]．电力工程技术，2023，42(3)：250-257.
GUI Xiaozhi，SONG Guobing，CHANG Peng，et al. Distance protection method applicable to renewable energy grid-connected systems[J]. Electric Power Engineering Technology，2023，42(3)：250-257(in Chinese).

[17] PRADHAN A K，JOÓS G. Adaptive distance relay setting for lines connecting wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion，2007，22(1)：206-213.

[18] 季亮，张林楠，姜恩宇，等．提升距离保护适应性的新能源主动故障控制研究[J]．太阳能学报，2022，43(7)：22-29.
JI Liang，ZHANG Linnan，JIANG Enyu，et al. Research on new energy active fault control to improve adaptability of distance protection[J]. Acta Energiae Solaris Sinica，2022，43(7)：22-29(in Chinese).

[19] 晁晨栩，郑晓冬，桂强，等．适用于光伏场站汇集线路的高频突变量纵联保护[J]．电网技术，2022，46(12)：4607-4615.
CHAO Chenxu，ZHENG Xiaodong，GUI Qiang，et al. High frequency component-based pilot protection for photovoltaic station collection line[J]. Power System Technology，2022，46(12)：4607-4615(in Chinese).

[20] 郑涛，宋祥艳．基于故障暂态行波高低频能量比值的交流输电线路快速保护方案[J]．电网技术，2022，46(12)：4616-4624.
ZHENG Tao，SONG Xiangyan. Fast protection scheme for AC transmission lines based on ratio of high and low frequency energy of transient traveling waves[J]. Power System Technology，2022，46(12)：4616-4624(in Chinese).

[21] 杨国生，樊沛林，王聪博，等．基于能量分布的新能源场站送出线路纵联保护[J]．电网技术，2023，47(4)：1415-1422.
YANG Guosheng，FAN Peilin，WANG Congbo，et al. Pilot protection based on energy distribution for transmission line connected to renewable power plants[J]. Power System Technology，2023，47(4)：1415-1422(in Chinese).

王兴国

在线出版日期：2024-06-07。
收稿日期：2023-09-18。

作者简介：

王兴国(1981)，通信作者，男，正高级工程师，研究方向为继电保护原理及算法，E-mail：xigua1852@163.com；

于溯(1995)，女，博士研究生，研究方向为新型电力系统保护与控制；

周泽昕(1969)，女，教授级高级工程师，研究方向为电力系统继电保护；

柳焕章(1954)，男，高级工程师，研究方向为电力系统继电保护。

（编辑　李健一）