

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240603

# 计及储能充放电特性的交流耦合光储电站送出线路纵联保护

刘素梅<sup>1</sup>, 王丹枫<sup>2</sup>, 韩伟<sup>3</sup>, 李伟<sup>4</sup>, 沈佳琪<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 中电华创电力技术研究有限公司, 上海 200086; 3. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 4. 电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院), 北京 100192)

**摘要:** 因储能充放电模式下潮流流向截然不同, 所以与同步发电机甚至光伏电站相比, 光储电站的故障特性存在显著差异, 传统电流差动保护面临更高的拒动风险。为此, 以含有“共享储能”的交流耦合光储电站为对象, 首先着重分析推导了储能电站在充放电模式下的短路电流相角变化特性及其计算表达式。进一步分析了交流耦合光储电站的短路电流变化规律, 从而揭示了光储电站分别作为电源和负荷运行时, 传统电流差动保护不正确动作的成因。针对所存在的问题, 提出了自适应调整等值阻抗幅值比的纵联保护新原理。利用线路两侧等值阻抗比, 识别区内外故障及正常运行工况。同时通过引入等值阻抗调整系数, 放大区内故障下线路两侧等值阻抗之间的差异, 以实现即使高比例光储电站接入线上发生高阻故障, 所提保护仍能够正确可靠动作。最终, 基于 PSCAD/EMTDC 搭建了含交流耦合光储电站电网的电磁暂态模型, 验证了所提保护的动作特性。

**关键词:** 短路电流特性; 纵联保护新原理; 阻抗幅值比; 储能电站; 交流耦合光储电站; 送出线路

## Pilot protection of exporting lines in AC-coupled PV-energy storage power stations considering the charging-discharging characteristics of energy storage systems

LIU Sumei<sup>1</sup>, WANG Danfeng<sup>2</sup>, HAN Wei<sup>3</sup>, LI Wei<sup>4</sup>, SHEN Jiaqi<sup>1</sup>

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. China Power Hua Chuang Electricity Technology Research Co., Ltd., Shanghai 200086, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 4. State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China)

**Abstract:** Because of the different power flow directions during the charge and discharge modes of energy storage systems (ESS), the fault characteristics of PV-energy storage power stations (PVESPs) differ significantly from those of synchronous generators and standalone PV power stations. As a result, traditional current differential protection faces a higher risk of malfunction. This paper focuses on AC-coupled PVESPs with shared ESS. It first derives and analyzes the phase angle variation characteristics of the short-circuit current from the ESS under both charge and discharge modes, along with their corresponding calculation formulas. Further analysis of the short-circuit current behavior in AC-coupled PVESPs reveals the reasons why traditional current differential protection may malfunction for the station operating as a power source and as a load, respectively. To address these issues, a novel pilot protection criterion is proposed based on adaptive adjustment of the equivalent impedance amplitude ratio. By using the equivalent impedance ratio of the two sides of the line, the method distinguishes between the internal and external faults as well as normal operating conditions. Also, an adaptive adjustment coefficient is added to amplify the difference between the equivalent impedances of the two sides under internal faults, ensuring that the proposed protection mechanism can still operate reliably even during high-resistance faults in lines with a high-proportion of PVESPs. Finally, an electromagnetic transient model of a power grid with AC-coupled PVESPs is built in PSCAD/EMTDC, and the operational characteristics of the proposed protection principle are verified.

This work is supported by the Young Scientists Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 52107069).

**Key words:** short-circuit current characteristics; novel pilot protection; impedance magnitude ratio; energy storage station; AC-coupled PV-energy storage power station; exporting line

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助(52107069)

## 0 引言

随着光伏电站接入容量的急剧增加, 其固有的随机性和波动性特性给电网的安全稳定运行带来了前所未有的严峻挑战<sup>[1-4]</sup>。为了应对这一挑战, 共享储能作为光伏电站所接区域电网的“功率调控器”, 已被逐渐广泛应用<sup>[5-9]</sup>。目前实际应用的共享储能电站多采用交流耦合方式与光伏电站同时接于电网中, 其容量占比相对较大, 对所接电网的故障特性影响较为显著。尽管光伏和储能系统均经过电力电子变流器并网, 两者短路电流特征都会受变流器暂态控制与保护策略影响<sup>[10-12]</sup>, 但是储能独特的充放电模式使其具有源荷二象性特征, 这导致光储电站相较于单一的光伏电站其故障形态更为复杂多样。因此, 传统基于同步机特性的继电保护原理存在更高的不正确动作风险。

为此, 目前已有一些文献分析了储能电站或光储电站源荷二象性特征对其短路电流变化特性的影响。文献[13]和文献[14]从故障特性分析角度, 给出了储能电站电磁暂态模型建立方法, 并明确了储能电站分别作为负荷在充电模式下和作为电源在放电模式下其故障响应特性存在较大差异。进一步地, 文献[15]和文献[16]分析了电网故障下储能变流器的暂态控制方式、电流限幅策略以及充放电模式等对短路电流变化特性的影响机理, 并推导了储能电站所能提供的短路电流幅值计算的表达式, 但是并未涉及短路电流相角计算。实际上, 受充放电模式影响, 与光伏等新能源场站不同, 储能电站或光储电站短路电流的相角变化特征更为复杂。

结合光伏电站等所提供短路电流的变化特征, 相关学者提出了一系列的电流保护新原理, 比如基于瞬时电流波形相关性<sup>[17-20]</sup>、正序电流分量<sup>[21]</sup>和正序与负序电流分量相位差<sup>[22]</sup>等的纵联保护判据, 但这些保护新原理均只针对“电网故障下光伏等新能源场站总作为电源向故障点馈出短路电流”的情况, 而实际电网故障下, 光储电站或储能电站也可能类似于负荷从电网吸收短路电流, 此场景下所提保护是否仍适用需进一步论证。为此, 文献[23]在考虑储能充放电模式影响的基础上, 结合正常运行工况、区内外故障下接有光储电站线路两侧瞬时差动电流/制动电流的轨迹曲线的差异性, 提出相应的纵联保护新判据。但是, 前述保护新原理均主要依赖于光伏电站或光储电站等的短路电流变化特性, 而该短路电流变化特性受并网变流器暂态控制与保护策略等影响, 当变流器控制与保护策略发生变化时, 保护能否正确动作有待进一步论证。

为此, 有学者利用高频阻抗不受电源控制策略及故障情况影响的特点, 通过比较线路两侧差动高频阻抗与制动高频阻抗的关系, 构造了高频纵联保护判据, 用于识别高比例光伏所接配电线路上的区内外故障<sup>[24]</sup>, 但高频纵联保护的工程可靠性有待进一步验证。也有学者根据故障发生前后线路两端差动电压与差动电流是否符合电容模型的特点, 提出了基于时域模型识别的纵联保护新原理<sup>[25]</sup>, 但该保护易受并网电力电子变流器控制所产生的高次谐波量影响。另外, 也有文献利用区内外故障下线路两端基频正序阻抗幅值比<sup>[26]</sup>、复合正序阻抗幅值与相角<sup>[27]</sup>的差异特征, 构造了纵联保护新判据, 但该基于基频率分量的保护判据无法实现分相动作。为此, 文献[28]基于特勒根定理, 利用线路两端基频分相电压和电流信息, 提出了一种纵联保护新判据, 但该判据在光储电站或储能电站接入场景下并不一定适用。文献[29]根据区内外故障下线路两侧的测量阻抗大小关系, 提出了一种阻抗差动保护判据, 但存在过渡电阻情况下测量阻抗的大小关系易受附加阻抗影响<sup>[30-31]</sup>, 同时也并未考虑储能电站同时接入后对其充放电模式的影响。

为此, 本文首先分析了储能分别在充电和放电模式下的故障响应特性, 着重推导了含大容量“共享储能”光储电站的短路电流相角计算表达式, 从而在计及充放电模式影响的基础上探究了光储电站所接电网采用传统电流差动保护存在的问题, 进一步提出了自适应调整等值阻抗幅值比的纵联保护判据。该保护判据中所提等值阻抗不受过渡电阻影响, 同时判据对储能充放电模式差异导致被保护故障线路两侧短路电流相角变化特征复杂的情况具有较强的适应性, 能够确保不同比例光储电站或储能电站接入后仍能够快速准确地识别故障。

## 1 交流耦合光储电站短路电流特性

揭示短路电流变化特性, 是研究光储电站纵联保护新原理的基础。交流耦合光储电站接入交流电网拓扑结构如图 1 所示。其中:  $\dot{U}_p$ 、 $\dot{U}_s$  分别为光储侧、系统侧保护安装处基频电压相量;  $\dot{i}_p$ 、 $\dot{i}_s$  分别为光储侧、系统侧保护安装处基频电流相量。本文考虑的储能系统为“共享储能”, 其容量相对较大, 不仅能够平抑光伏电站输出功率, 也可进行区域性的功率调控。这也就意味着储能的不同充放电模式将使得从电网侧看整个光储电站具有源荷二象性。

如图 1 所示, 光储电站接入电网的拓扑结构, 储能和光伏系统均经电力电子变换器接入电网, 其

短路电流变化特性与各自变流器暂态控制与保护策略紧密相关。电网故障下，处于放电模式的储能与光伏发电系统类似，均作为电源会向短路点提供短路电流，而处于充电模式的储能系统会像负荷一样，从电网中吸收一定的短路功率，这将使得光储电站或储能电站短路电流的相角在较大范围内变化。

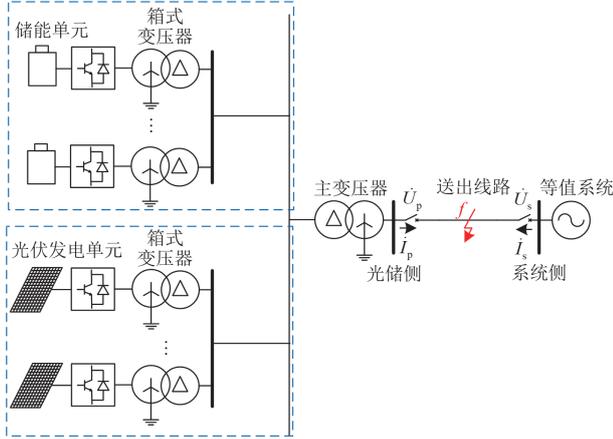


图 1 交流耦合光储电站接入电网拓扑结构

Fig. 1 Topology of AC-coupled photovoltaic-energy storage-integrated power station connected into power grid

根据我国发布的《电化学储能电站建模导则》以及已有相关文献中储能电磁暂态模型描述<sup>[13,32-33]</sup>，目前广泛使用的交流耦合储能系统通常由储能电池经 DC/AC 变流器和升压变压器并网，变流器通过 P-Q 控制储能电池输出或输入功率以实现充放电模式控制，其控制框图如图 2 所示。

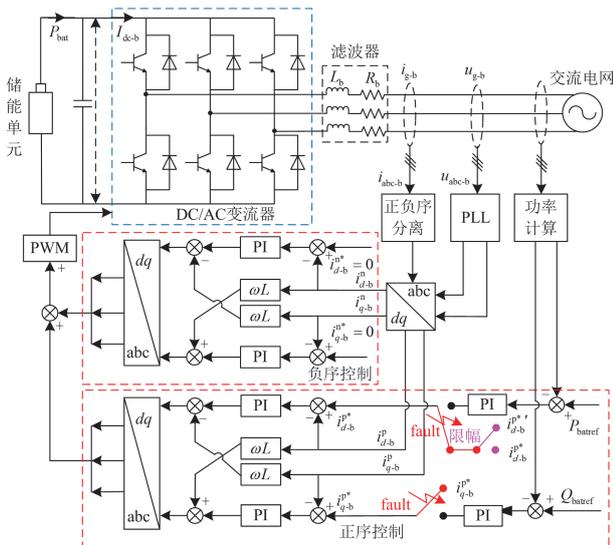


图 2 储能系统拓扑结构及控制框图

Fig. 2 Topology and control block of grid-connected energy storage system

如图 2 所示，储能变流器电流控制内环通常采用抑制负序电流的控制策略，其正负序电流参考值的表达式为

$$\begin{cases} i_{d-b}^{p*} = P_{0-b}^* / u_{gd-b}^p \\ i_{q-b}^{p*} = 1.6(0.85 - \gamma_b) I_{N-b} & 0.2 < \gamma_b < 0.85 \\ i_{d-b}^{n*} = 0 \\ i_{q-b}^{n*} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $i_{d-b}^{p*}$  为储能变流器  $d$  轴正序电流参考值； $P_{0-b}^*$  为有功功率参考值，放电模式为正，充电模式为负； $u_{gd-b}^p$  为储能系统并网点正序电压； $i_{q-b}^{p*}$  为储能变流器  $q$  轴正序电流参考值，与无功功率有关，其计算表达式由电网故障穿越要求确定； $\gamma_b$  为储能并网点正序电压跌落系数， $\gamma_b = u_{gd-b}^p / U_{gN}$ ，其中  $U_{gN}$  为并网点额定电压； $I_{N-b}$  为储能变流器额定电流； $i_{d-b}^{n*}$ 、 $i_{q-b}^{n*}$  分别为储能变流器  $d$ 、 $q$  轴负序电流参考值，在抑制负序电流策略下置 0。

当电网故障较严重且有功功率参考值  $P_{0-b}^*$  较大时，流过变流器的电流会超限，即大于 1.2~1.5 倍额定电流，此时变流器控制回路中电流限幅环节将发生作用，正序电流参考值被重置为

$$i_{d-b}^{p*'} = \begin{cases} \sqrt{I_{lim-b}^2 - (i_{q-b}^{p*})^2} & P_{0-b}^* > 0 \\ -\sqrt{I_{lim-b}^2 - (i_{q-b}^{p*})^2} & P_{0-b}^* < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $i_{d-b}^{p*'}$  为储能变流器  $d$  轴正序电流重置参考值； $I_{lim-b}$  为储能变流器允许流过的最大电流，即 1.2~1.5 倍的额定电流。

计及电流限幅环节影响的基础上，充电模式下储能系统电流与其并网点电压相角差为

$$\theta_{\Delta-b} = \begin{cases} \pi - \arctan(1.6\gamma_b(0.85 - \gamma_b)S_{N-b}/P_{f-b}) & \alpha_b = 0 \\ \pi - \arctan(1/\sqrt{(I_{lim-b}/(I_{N-b}1.6\gamma_b(0.85 - \gamma_b)))^2 - 1}) & \alpha_b = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\theta_{\Delta-b}$  为储能系统电流与其并网点电压相角差； $S_{N-b}$  为储能的额定容量； $P_{f-b}$  为储能变流器输出的有功功率，其大小主要由储能系统充放电状态、储能变流器控制系统有功功率参考值、电流限幅环节作用与否等决定； $\alpha_b$  为电流限制系数， $\alpha_b = 0$  表示储能变流器电流限幅环节未作用， $\alpha_b = 1$  表示发生作用。

放电模式下，储能系统电流与其并网点电压相角差  $\theta'_{\Delta-b}$  为

$$\theta'_{\Delta-b} = \begin{cases} \arctan(1.6\gamma_b(0.85 - \gamma_b)S_{N-b}/P_{f-b}) & \alpha_b = 0 \\ \arctan(1/\sqrt{(I_{lim-b}/(I_{N-b}1.6\gamma_b(0.85 - \gamma_b)))^2 - 1}) & \alpha_b = 1 \end{cases} \quad (4)$$

分析式(3)和式(4), 储能电站短路电流相角主要与其额定容量、并网点电压跌落程度、电流限幅环节作用与否和故障期间有功功率目标值等有关。但是, 因充电与放电模式下有功功率流向相反, 充电模式下储能短路电流相对于并网点电压的相角差为 $90^\circ\sim 180^\circ$ , 放电模式下该相角差却为 $0^\circ\sim 90^\circ$ 。

以上着重分析电网故障下处于充电或放电模式的储能电站的短路电流相角的变化特性, 而对于含大容量“共享储能”的交流耦合光储电站而言, 其短路电流与储能充放电模式、储能和光伏接入容量比、故障期间储能与光伏变流器电流限幅环节作用与否以及电网无功支撑要求有关。由于受电流限幅环节约束, 光储电站的短路电流幅值最大不超过光伏变流器与储能变流器额定电流之和的 $1.2\sim 1.5$ 倍, 其变化规律与单一光伏电站基本类似。而短路电流相角除了受故障期间容性无功功率支撑影响之外, 还与光储电站总有功功率的方向有关。总有功功率为正或负时, 光储电站的短路电流相角变化特性分别与处于放电或充电模式的储能的短路电流相角变化规律相似。不同于单一光伏电站, 故障期间光储电站的短路电流相角的变化范围为 $0^\circ\sim 180^\circ$ 。

## 2 自适应调整等值阻抗幅值比的纵联保护

### 2.1 传统电流差动保护动作特性

图1中光储电站所接送出线路采用传统电流差动保护的判据可表示为

$$|\dot{I}_p + \dot{I}_s| > K |\dot{I}_p - \dot{I}_s| \dot{I}_p \dot{U}_s \quad (5)$$

式中:  $|\dot{I}_p + \dot{I}_s|$  为差动电流;  $|\dot{I}_p - \dot{I}_s|$  为制动电流;  $K$  为比率制动系数, 通常取为 $0.5\sim 0.8$ 。

若线路两侧均接常规电源时, 区内故障下两侧短路电流总由母线流向故障点, 且两侧电流相角差为锐角, 根据相量运算的平行四边形法则, 差动电流总大于制动电流。

而当线路上其中一侧接有含大容量储能的交流耦合光储电站时, 两侧差动电流与制动电流的大小关系将受光储电站运行模式影响, 具体表现如下:

1) 光储电站作为电源向电网输出有功功率时, 线路上发生故障后, 将由母线流向线路规定为电流正方向, 线路光储电站侧电流 $\dot{I}_p$ 的流向为正, 即电流 $\dot{I}_p$ 与电压 $\dot{U}_p$ 之间夹角为锐角, 但受无功支撑影响, 该锐角通常取为正值, 而系统侧电流 $\dot{I}_s$ 与电压 $\dot{U}_s$ 之间夹角通常为负的锐角, 如图3所示。在光储电站输出无功功率相对较大情况下, 电流 $\dot{I}_p$ 与 $\dot{I}_s$ 之间的夹角可能为钝角, 此时差动电流小于制动电流,

随着光储电站容量的增大, 即当线路上靠近该电站侧电流幅值显著上升时, 制动电流相较于差动电流的增长也将更为明显, 这将会使得传统电流差动保护灵敏性降低甚至出现保护拒动的问题。

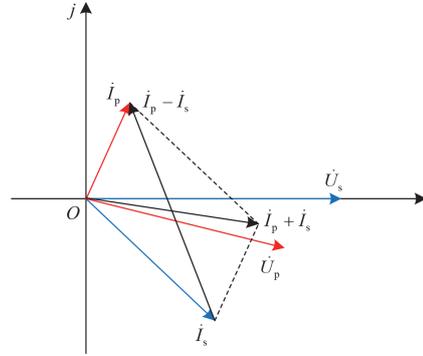


图3 故障下光储电站作为电源运行时差动与制动电流关系  
Fig. 3 Relationship between differential and restraint current when the photovoltaic-energy storage-integrated power station operates as a power source during grid faults

2) 当光储电站作为负荷从电网吸收有功功率时, 线路上光储侧电流 $\dot{I}_p$ 与电压 $\dot{U}_p$ 夹角为钝角, 此时光储侧电流与系统侧电流之间夹角始终为钝角, 该钝角通常比光储电站作为电源运行时线路两侧电流相角差大得多, 因此即使光储电站接入容量较小, 仍很大可能会出现线路两侧差动电流比制动电流小得多, 如图4所示, 电流差动保护拒动的风险会大大增加。

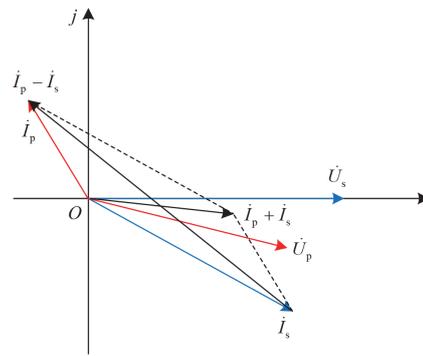


图4 故障下光储电站作为负荷运行时差动和制动电流关系  
Fig. 4 Relationship between differential and restraint current when the photovoltaic-energy storage-integrated power station operates as a load during grid faults

### 2.2 保护新判据及实现方案

由前文分析可知, 当储能系统运行于充电模式光储电站作为负荷接入电网时, 传统电流差动保护将存在较大拒动风险。为此, 本文提出了自适应调整等值阻抗幅值比的纵联保护判据。

这里首先给出线路光储侧与系统侧测量等值阻抗的定义如式(6)所示。

$$\begin{cases} Z_p = \frac{\dot{U}_p - \dot{U}_s}{\dot{I}_p} \\ Z_s = \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_p}{\dot{I}_s} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $Z_p$ 和 $Z_s$ 分别为线路上光储侧、系统侧测量等值阻抗。与已有保护判据中测量阻抗(通常定义为 $\dot{U}_p/\dot{I}_p$ )不同，本文所提测量等值阻抗不受故障过渡电阻影响。首先以光储电站作为电源运行为例，线路上光储电站侧测量等值阻抗的计算表达式可进一步推导为

$$Z_p = \alpha Z_L + \left(1 + \frac{\dot{I}_s}{\dot{I}_p}\right) R_g - \left[ \frac{\dot{I}_s(1-\alpha)Z_L + (\dot{I}_s + \dot{I}_p)R_g}{\dot{I}_p} \right] = \alpha Z_L - (1-\alpha)Z_L \dot{I}_s / \dot{I}_p \quad (7)$$

式中： $\alpha$ 为故障点至线路上光储侧保护安装处的距离； $Z_L$ 为被保护线路的阻抗； $R_g$ 为故障过渡电阻。

若光储电站作为负荷运行时，同样可得线路上光储电站侧测量等值阻抗为

$$Z_p = \left(\frac{\dot{I}_s}{\dot{I}_p} - 1\right) R_g - \alpha Z_L - \left[ \frac{\dot{I}_s(1-\alpha)Z_L + (\dot{I}_s - \dot{I}_p)R_g}{\dot{I}_p} \right] = -\alpha Z_L - (1-\alpha)Z_L \dot{I}_s / \dot{I}_p \quad (8)$$

从式(7)和式(8)可以看出，测量等值阻抗 $Z_p$ 只与故障点至保护安装处的距离 $\alpha$ 、整条线路阻抗以及线路两侧电流大小有关，而与故障电阻 $R_g$ 无关。实际上，在线路两侧实测电流和整条线路阻抗已知情况下，测量等值阻抗可用于描述实际短路距离。另外，对比式(7)和式(8)，可发现光储电源作为负荷运行时，其对应测量等值阻抗幅值通常较大，可能会远大于实际故障线路阻抗。因此，后文提出利用线路两侧等值阻抗幅值比识别区内故障。

### 2.2.1 线路两侧测量等值阻抗变化特征分析

根据图1所示光储电站接入电网的拓扑结构，图5为光储电站分别作为电源或负荷运行时在不同场景下的等效简图。忽略线路上分布电容电流的影响，正常运行工况下线路两侧保护安装处测量所得基频电流大小相等、方向相反，此情况下光储侧与系统侧测量等值阻抗基本相等，即两侧等值阻抗比接近于1，如式(9)所示。

$$|Z_p| = |Z_s| \Rightarrow |Z_p|/|Z_s| = 1 \quad (9)$$

当线路光储侧区外 $f_1$ 处和系统侧区外 $f_2$ 处发生

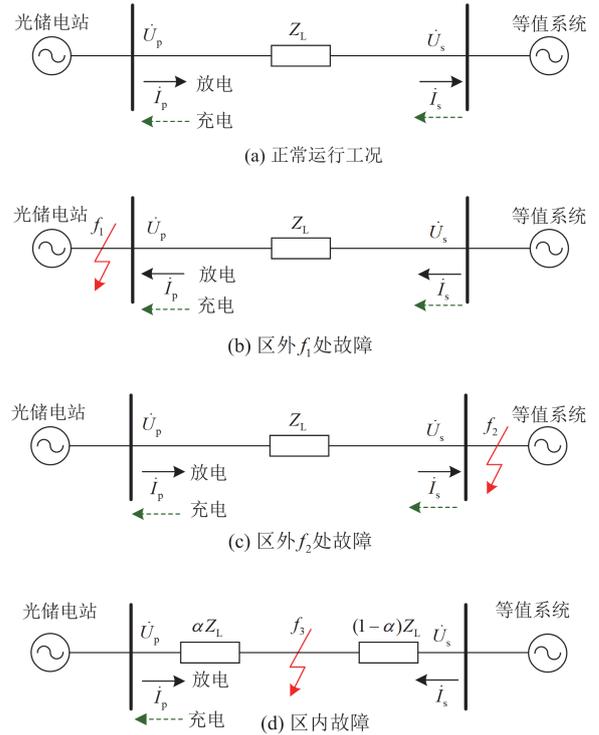


图5 不同运行模式下光储电站所接电网的等效电路简图

Fig. 5 Equivalent circuit of power grid connected to the photovoltaic-energy storage-integrated power station under different operation modes

故障时，线路两侧保护安装处测量等值阻抗大小关系与正常运行工况基本类似，即光储侧和系统侧测量等值阻抗幅值相等，式(9)关系仍成立。

但是，若线路上 $f_3$ 处发生区内故障时，光储侧电流流向将与储能充放电模式直接相关，储能工作于充电模式下，若光储电站作为负荷运行时，线路上光储侧电流将不再由母线流向故障点，而是与区外 $f_1$ 处故障下电流流向一致。但此情况下线路两侧测量等值阻抗的大小关系与区外 $f_1$ 处故障有较大区别，这主要是因为区内故障时光储侧与系统侧电流幅值有较大差异。实际上，不管光储电站作为电源还是负荷运行，通常因受电力电子变流器电流限幅环节影响，光储侧短路电流被限制为1.2~1.5倍额定电流，而系统侧短路电流通常为额定电流的5~6倍。即使在光储电站接入比例较高的场景下，故障期间系统所提供短路电流与光储电站基本相当时，由于影响光储电站所提供短路电流大小的因素与所接系统不同，所以线路上光储侧短路电流幅值的变化幅度与系统侧也完全不同，这将使得区内故障下线路光储侧测量等值阻抗值将明显不同于系统侧测量等值阻抗，即满足式(10)。

$$|Z_p| > |Z_s| \text{ 或 } |Z_p| < |Z_s| \Rightarrow |Z_p|/|Z_s| \neq 1 \quad (10)$$

通过上述分析可知, 本文利用所提测量等值阻抗比来识别区内外故障, 并不会受充电模式下光储电站作为负荷运行导致保护安装处电流反向问题的影响。区内故障下, 线路两侧等值阻抗比总远大于或者远小于 1; 而区外故障或正常运行工况下, 不管光储电站作为电源运行还是作为负荷运行, 线路两侧保护安装处等值阻抗比均接近于 1。

### 2.2.2 保护新判据

根据前文所述区内外故障或正常运行工况下线路两侧测量等值阻抗幅值比的大小关系, 同时考虑到光储电站接入容量较大的场景, 即故障期间光储电站侧  $\dot{I}_p$  与系统侧短路电流  $\dot{I}_s$  的幅值相差不大的情况, 这里引入等值阻抗调整系数, 从而构造保护新判据如式(11)所示。

$$\begin{cases} |Z_1|/|Z_2| > K_Z \\ Z_1 = K_{Z_1} \cdot \max\{|Z_p|, |Z_s|\} \\ Z_2 = K_{Z_2} \cdot \min\{|Z_p|, |Z_s|\} \\ K_{Z_1} = \max(e^{|\Delta \dot{I}_p| - \Delta |\dot{I}_s|}, 1/e^{|\Delta \dot{I}_p| - \Delta |\dot{I}_s|}) \\ K_{Z_2} = \min(e^{|\Delta \dot{I}_p| - \Delta |\dot{I}_s|}, 1/e^{|\Delta \dot{I}_p| - \Delta |\dot{I}_s|}) \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $K_Z$  为动作门槛值, 本文取 1.2, 主要考虑正常运行和区外故障下部分采样值不准确等可能引起线路两侧等值阻抗幅值比大于 1;  $K_{Z_1}$  和  $K_{Z_2}$  分别为与等值阻抗  $Z_1$  和  $Z_2$  对应的调整系数;  $e$  为自然常数 2.71828...;  $\Delta |\dot{I}_p|$ 、 $\Delta |\dot{I}_s|$  分别为光储侧、系统侧保护安装处工频电流幅值变化量, 其对应计算表达式如式(12)。

$$\begin{cases} \Delta |\dot{I}_p(t)| = |\dot{I}_p(t)| - |\dot{I}_p(t-1)| \\ \Delta |\dot{I}_s(t)| = |\dot{I}_s(t)| - |\dot{I}_s(t-1)| \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $|\dot{I}_p(t)|$  和  $|\dot{I}_s(t)|$  分别为光储侧和系统侧当前时刻的工频电流幅值;  $|\dot{I}_p(t-1)|$  和  $|\dot{I}_s(t-1)|$  分别为光储侧和系统侧前一时刻工频电流幅值。故障前线路两侧工频电流幅值变化量  $\Delta |\dot{I}_p(t)|$  与  $\Delta |\dot{I}_s(t)|$  的差值均基本接近于 0, 一旦故障发生  $\Delta |\dot{I}_p(t)|$  和  $\Delta |\dot{I}_s(t)|$  均将会发生变化。

由于光储侧逆变器电流限幅环节作用, 区内故障下线路上光储侧与系统侧之间的工频电流幅值变化会存在明显差异, 且这种差异在经过自然对数运算处理后, 会进一步被显著放大。即使线路两侧工频电流幅值变化量的差异不大, 与等值阻抗  $Z_1$  和  $Z_2$

对应的调整系数的差异也会比较大。因此, 所提保护判据中引入等值阻抗调整系数  $K_{Z_1}$  和  $K_{Z_2}$ , 会进一步放大区内故障下等值阻抗  $Z_1$  与  $Z_2$  之间的差距, 使得其比值远大于 1, 从而确保所提保护具有较高灵敏度。而在区外故障和正常运行情况下, 线路两侧工频电流幅值变化量几乎相等, 自然底数运算后结果为 1, 即调整系数  $K_{Z_1}$  和  $K_{Z_2}$  的存在并不会改变线路两侧等值阻抗的大小关系, 此情况下  $|Z_1|/|Z_2|$  近似等于 1, 所提保护能够可靠不误动。结合前文分析, 本文所提的基于自适应调整等值阻抗幅值比的纵联保护算法流程图如图 6 所示。

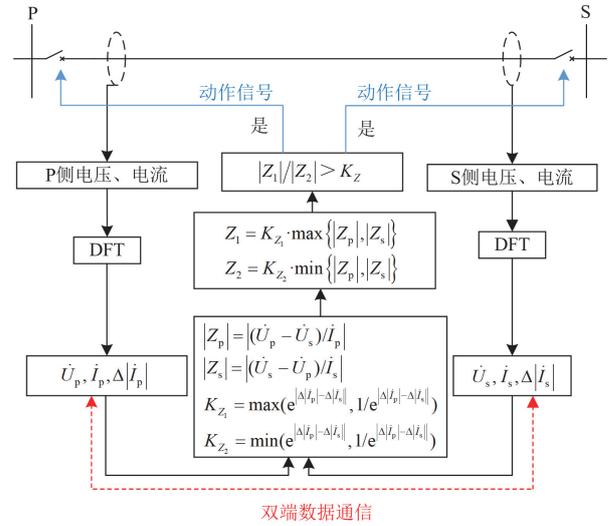


图 6 所提保护算法流程图

Fig. 6 Flowchart of the proposed protection algorithm

如图 6 所示, 首先利用电流与电压互感器测量线路两侧瞬时电流和电压, 之后分别通过离散傅里叶算法(discrete Fourier transformation, DFT)计算工频电流相量与电压相量, 进一步利用当前时刻与前一时刻工频电流相量, 计算工频电流变化量, 根据线路两侧工频电流相量与电压相量得到各自的测量等值阻抗  $Z_p$  与  $Z_s$ , 由工频电流变化量得到等值阻抗调整系数, 从而求解测量等值阻抗与调整系数乘积的最大值与最小值, 以进一步判断其比值是否大于保护动作门槛值  $K_Z$ 。若大于  $K_Z$  则判别为区内故障, 保护动作; 否则保护不动作。

与传统电流差动保护相比, 本文提出利用线路两侧等值阻抗幅值比来识别区内故障, 并不会受储能系统充放电状态下短路电流相角差异影响, 即光储电站作为电源和负荷运行时所提保护判据均能够可靠地判别出区内外故障。另外, 与现有基于测量阻抗的保护判据相比, 所提等值阻抗并不会受过渡

电阻影响,同时引入阻抗调整系数能够较好地确保区内故障下即使线路两侧电流幅值接近(即两侧实测等值阻抗比值接近于1),但因两侧电流变化量存在差异,使得调整后的等值阻抗比值总能够远大于1,从而准确快速地识别故障。

### 3 仿真验证

结合某省含光伏电站实际电网数据,针对图1所示的电网拓扑结构,基于PSCAD/EMTDC搭建了含大容量“共享储能”交流耦合光储电站接入电网的电磁暂态模型,验证本文所提纵联保护判据的有效性。交流耦合光储电站中的光伏发电单元和储能单元均经过0.69 kV/35 kV的箱式变压器接入35 kV集电线路;箱式变压器短路电压百分数为6.05%,短路损耗为105 kW;35 kV集电线路长度为3.3 km,其单位长度正负序阻抗均为 $0.111 + j0.377 \Omega/\text{km}$ 、零序阻抗为 $0.343 + j1.152 \Omega/\text{km}$ 。35 kV/110 kV主变压器短路电压百分数为5%,短路损耗为90 kW。110 kV送出线路长度为20 km,单位长度正负序阻抗均为 $0.106 + j0.38 \Omega/\text{km}$ 、零序阻抗为 $0.328 + j1.28 \Omega/\text{km}$ 。等值系统的阻抗为 $1.39 + j6.26 \Omega$ <sup>[29]</sup>。另外,本节仿真试验中故障时刻

均设置为 $t = 2 \text{ s}$ 。

#### 3.1 不同故障位置和类型

为验证本文所提保护判据的有效性,假设光储电站总有功功率分别为60 MW和-60 MW,区外 $f_1$ 、 $f_2$ 和区内 $f_3$ 处发生单相接地、两相相间接地、两相相间或三相短路故障(过渡电阻均为 $15 \Omega$ )。

表1为故障线路两侧等值阻抗幅值比及保护动作情况,可看出不管光储电站作为电源还是负荷运行,区外 $f_1$ 、 $f_2$ 处发生故障时,故障相与非故障相线路两侧等值阻抗 $Z_1$ 与 $Z_2$ 的幅值比均接近于1,所提保护判据可靠不动作。而当区内 $f_3$ 处发生故障时,任意故障类型下,故障相两侧等值阻抗幅值比均远大于1.2,而非故障相两侧等值阻抗幅值比均接近于1,保护判据能够实现故障相动作、非故障相不动作。

同时,对比可以发现,相同故障条件下光储电站作为负荷运行时,等值阻抗幅值比相对较大,即故障特征更为明显,这有助于所提保护更好地识别故障,有效避免了故障线路两侧短路电流相角变化特征复杂对故障识别准确度的影响。

表1 不同故障位置和故障类型下故障线路两侧等值阻抗幅值比及所提保护动作情况

Table 1 Amplitude ratio of equivalent impedance on both sides of the faulted line and the action of the proposed protection criterion under different fault locations and types

故障位置	故障类型	光储电站作为电源时等值阻抗幅值比( $Z_1/Z_2$ )			光储电站作为负荷时等值阻抗幅值比( $Z_1/Z_2$ )		
		A相	B相	C相	A相	B相	C相
$f_1$	AG	1.039×	1.041×	1.019×	1.013×	1.007×	1.036×
	AB	1.025×	1.042×	1.011×	1.017×	1.008×	1.022×
	ABG	1.030×	1.051×	1.027×	1.015×	1.007×	1.008×
	ABCG	1.038×	1.046×	1.035×	1.013×	1.008×	1.008×
$f_2$	AG	1.012×	1.011×	1.056×	1.035×	1.012×	1.014×
	AB	1.011×	1.005×	1.003×	1.012×	1.017×	1.031×
	ABG	1.032×	1.002×	1.021×	1.047×	1.038×	1.010×
	ABCG	1.007×	1.007×	1.003×	1.011×	1.009×	1.009×
$f_3$	AG	20.343√	1.008×	1.032×	118.922√	1.006×	1.028×
	AB	445.102√	420.932√	1.003×	3772.24√	5270.03√	1.039×
	ABG	54.382√	26.864√	1.025×	333.41√	933.69√	1.009×
	ABCG	148.157√	125.638√	120.656√	1108.31√	1125.89√	913.69√

注:表中“√”表示保护动作,“×”表示保护不动作,后文表2中同样按此方法表示。

#### 3.2 不同过渡电阻

针对易受过渡电阻影响的单相接地短路故障,这里光储电站的运行模式及总输出功率与前文相同,以送出线路上 $f_3$ 处(线路中点位置)发生A相接地短路故障为例,过渡电阻分别为 $30 \Omega$ 、 $50 \Omega$ 、

$100 \Omega$ 时,对比分析所提保护的動作特性。图7为光储电站侧测量等值阻抗与测量阻抗曲线,图8为保护動作特性曲线。

对比图7(a)和图7(b)可以发现,光储电站作为电源运行时,线路上保护安装处所测等值阻抗并不

会受过渡电阻影响, 均小于实际故障线路的阻抗幅值(根据前文所给参数计算, 线路阻抗幅值为  $6.8 \Omega$ )。但是, 保护安装处测量阻抗随过渡电阻增大逐渐增加, 过渡电阻为  $30 \Omega$  时, 测量阻抗为  $80 \Omega$  左右, 远大于故障线路阻抗。

另外, 如图 7(c)和图 7(d)所示, 当光储电站作为负荷运行时, 线路上所测等值阻抗和测量阻抗随过渡电阻变化而变化的趋势一致, 即过渡电阻越大, 测量等值阻抗与测量阻抗越小。结合式(8), 线路上测量等值阻抗和测量阻抗均会受线路两侧电流比值影响, 高阻接地故障下线路两侧电流比值较小, 所以等值阻抗与测量阻抗也相对较小。但是由于光储电站与所接系统故障响应特性不同, 光储侧短路电流变小的幅度与系统侧短路电流变小的幅度有较大不同, 这将使得区内故障下即使发生高阻接地故障线路两侧等值阻抗幅值比总大于保护门槛值。另外, 对比图 7(c)和图 7(d)可以发现, 光储电站作为负荷运行时, 光储侧等值阻抗总大于故障线路阻抗, 而系统侧通常为常规电源, 其等值阻抗小于故障线路阻抗, 因此利用所提基于等值阻抗幅值比的保护判据可有效识别高阻接地故障。

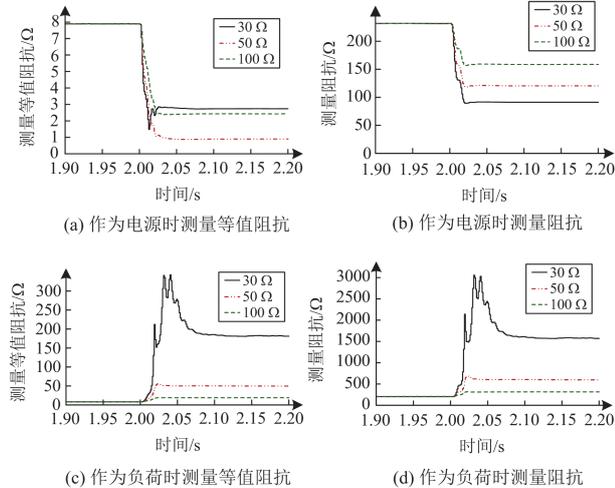


图 7 光储电站侧测量等值阻抗与测量阻抗曲线

Fig. 7 Equivalent impedance and measured impedance curves on the side of photovoltaic and energy storage power station

如图 8 所示, 不同过渡电阻下, 即使发生  $50 \Omega$  与  $100 \Omega$  高阻接地故障, 光储电站作为负荷运行时线路两侧等值阻抗幅值比  $|Z_1/Z_2|$  总大于光储电站作为电源运行时的等值阻抗幅值比, 即所提保护具有更高灵敏度。同时, 对比可以发现光储电站作为电源运行时, 过渡电阻越大, 等值阻抗幅值比越小, 但均大于保护动作门槛值, 保护能可靠动作。值得指出的是等值阻抗幅值比变小, 主要由于高阻接地

故障下线路两侧电流及电流变化量差异较小所致。

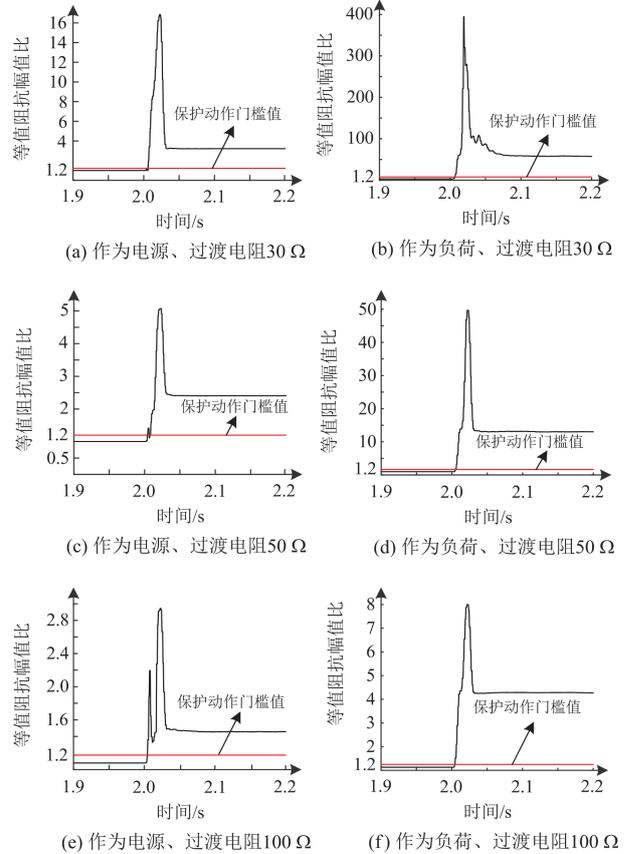


图 8 不同过渡电阻下本文所提保护动作特性  
Fig. 8 Action characteristics of the proposed protection under different faulted resistances

### 3.3 不同接入容量

为分析光储电站不同接入容量对本文所提保护的影响, 假设光储电站总有功率分别为  $30 \text{ MW}$ 、 $60 \text{ MW}$ 、 $100 \text{ MW}$ , 线路  $f_3$  处发生过渡电阻为  $15 \Omega$  的故障, 表 2 为等值阻抗幅值比及所提保护动作情况。

从表 2 可以看出, 随着光储电站接入容量增加, 无论作为电源运行还是作为负荷运行, 所接线路两侧等值阻抗幅值比均将减小, 最小为  $12.617$ , 该最小值也远大于保护动作门槛值, 本文所提保护判据能够可靠识别区内故障。光储电站容量增加会使得线路上光储侧短路电流变大, 从而使得系统侧与光储侧短路电流比值变小, 如式(7)和式(8)所示, 所测得的等值阻抗就会随之变小。考虑到电流限幅作用的影响, 即使光储电站所接容量与所接电网短路容量相当, 但在线路上发生故障时, 光储电站侧的短路电流幅值往往低于系统侧, 所以光储侧的等值阻抗通常大于系统侧。结合式(11), 即使光储电站容量增加会使光储侧等值阻抗变小, 从而导致线路两侧阻抗幅值比减小, 但该幅值比不会小于 1。

表 2 光储电站接入容量不同时故障线路两侧等值阻抗幅值比及所提保护动作情况

Table 2 Amplitude ratio of equivalent impedance on both sides of the faulted line and the action characteristics of the proposed protection criterion with different capacity of photovoltaic-energy storage-integrated power station

光储电站 总有功率/MW	故障类型	光储电站作为电源时等值阻抗幅值比( $Z_1/Z_2$ )			光储电站作为负荷时等值阻抗幅值比( $Z_1/Z_2$ )		
		A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
30	AG	25.944√	1.045×	1.031×	118.922√	1.006×	1.028×
	AB	765.355√	652.389√	1.006×	3772.24√	5270.03√	1.039×
	ABG	72.375√	41.182√	1.046×	333.41√	933.69√	1.009×
	ABCG	376.378√	313.902√	302.449√	1108.31√	1125.89√	913.69√
60	AG	20.343√	1.008×	1.032×	80.31√	1.003×	1.009×
	AB	445.102√	420.932√	1.003×	1087.49√	1286.46√	1.026×
	ABG	54.382√	26.864√	1.025×	226.88√	186.15√	1.003×
	ABCG	148.157√	125.638√	120.656√	325.99√	331.66√	264.88√
100	AG	12.724√	1.003×	1.041×	20.55√	1.003×	1.041×
	AB	128.229√	144.403√	1.013×	318.24√	358.09√	1.012×
	ABG	43.519√	12.617√	1.008×	185.19√	104.52√	1.002×
	ABCG	48.743√	38.268√	39.359√	123.12√	129.95√	94.18√

另外，在相同接入容量条件下，当光储电站作为负荷运行时，其接入线路两侧的等值阻抗幅值比总是大于光储电站作为电源运行时的阻抗幅值比，保护具有更高的灵敏度。

### 3.4 保护响应速度

为验证本文所提保护判据的响应速度，这里设置在图 5 中  $f_3$  处发生过渡电阻为  $15 \Omega$  和  $100 \Omega$  三相短路故障和 AB 相接地短路故障，光储电站作为电源或负荷的总有功率分别为  $60 \text{ MW}$  和  $-60 \text{ MW}$ ，图 9 所示为所提保护的响应速度曲线。

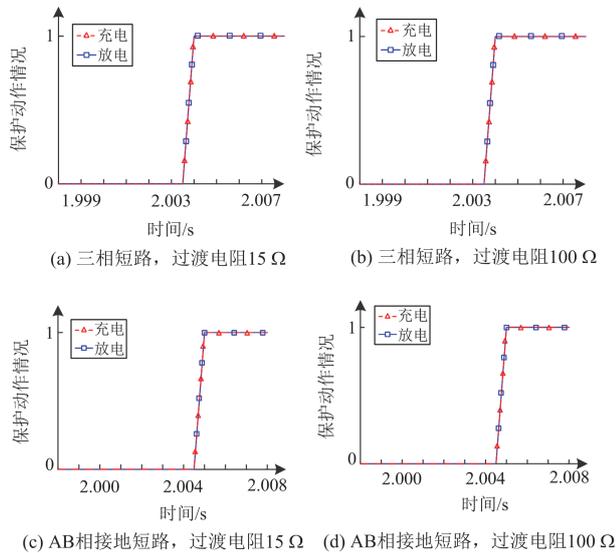


图 9 所提保护判据的响应速度曲线

Fig. 9 Response speed of proposed protection criterion

如图 9 所示，在相同故障类型及过渡电阻下，光储电站作为电源运行或负荷运行并不会使得所

提保护响应速度发生改变。同时，从图 9(a)和图 9(b)中可以看出，若发生三相短路故障，即使是过渡电阻为  $100 \Omega$  高阻故障，所提保护判据也能够在故障后  $4 \text{ ms}$  内动作。相比之下，两相接地故障下，所提保护动作速度相对较慢，动作时间为  $5 \text{ ms}$  左右。同样地，两相接地短路故障下，不同过渡电阻对保护响应速度影响也较小。然而，通常电力系统要求主保护的响应时间在  $10 \text{ ms}$  左右，最大不超过  $20 \text{ ms}$ ，这也就意味着所提保护能够满足电网主保护的响应速度要求。

### 3.5 数据传输延时影响

由于所提保护为双端量保护，线路两侧数据通信延时可能会对保护动作特性产生影响。这里设定光储电站作为电源或负荷的总有功率分别为  $60 \text{ MW}$  和  $-60 \text{ MW}$ ，以送出线路区内  $f_3$  处发生 A 相接地短路故障为例，设置线路上光储侧故障时间序列无延时、延时  $5 \text{ ms}$  和延时  $10 \text{ ms}$  3 种故障场景，探讨通信延时对所提保护性能的影响。图 10 所示为前述 3 种不同场景下等值阻抗幅值比变化曲线。

从图 10(a)中可以看出，当光储电站作为电源运行时，尽管通信延时会线路两侧等值阻抗幅值比的大小产生一定影响，但在故障后  $10 \text{ ms}$  以内保护均能够正确动作。同样，从图 10(b)中可以看出，光储电站作为负荷运行时，在不同通信延时工况下，虽等值阻抗幅值比达到峰值的时间有所不同，延时时间越长，幅值比达到峰值所需的时间越长，但由于保护灵敏度较高，保护响应时长均在  $10 \text{ ms}$  以内。因此，通信延时对所提保护响应速度无明显影响，即保护判据具有一定抗数据通信延时能力。

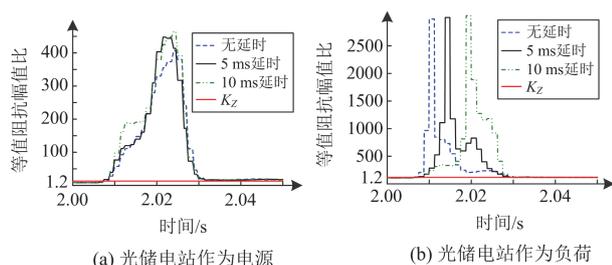


图 10 通信延时对所提保护判据的影响

Fig. 10 Influence of communication delay on the proposed protection criterion

## 4 结论

本文推导了储能电站在充放电模式下基频短路电流相角的计算表达式, 并进一步分析了含大容量“共享储能”的交流耦合光储电站短路电流变化特性, 从而明确了传统电流差动保护在光储电站接入场景下存在区内故障拒动的问题, 尤其光储电站作为负荷运行时保护拒动风险更大。针对已有保护存在的拒动问题, 提出了自适应调整等值阻抗幅值比的纵联保护判据, 该保护判据在光储电站作为负荷运行时具有更高的灵敏度, 经过理论与仿真分析得出如下结论:

1) 含大容量“共享储能”的交流耦合光储电站并网点短路电流与储能系统充放电模式、故障期间储能与光伏逆变器电流限幅环节作用与否以及输出无功功率大小等有关。受并网逆变器电流限幅控制影响, 光储电站所提供短路电流幅值最大不超过 1.2~1.5 倍额定电流; 短路电流相角不仅与故障期间输出无功功率大小有关, 还与并网点有功功率的方向(主要受储能系统充放电模式影响)有关, 相对于并网点电压, 其相角的变化范围为  $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

2) 与作为电源运行时相比, 光储电站作为负荷运行时, 所接线路两侧等值阻抗幅值比通常较大, 所提保护判据在此场景下具有更高的灵敏度, 有效解决了传统电流差动保护在光储电站作为负荷运行时拒动风险更大的问题。同时, 相同故障过渡电阻和故障类型条件下, 光储电源的运行工况并不会对所提保护的响应时长产生影响, 通常能在故障后 5 ms 内快速动作。

3) 不同于测量阻抗, 所提等值阻抗与故障过渡电阻并不直接相关, 同时在保护判据中引入等值阻抗调整系数, 实现区内故障下放大线路两侧实测等值阻抗之间的差距, 而在区外故障和正常运行情况下不改变线路两侧等值阻抗的大小关系, 这使得所提保护判据的动作特性基本不受过渡电阻影响, 即使在高阻接地故障下, 保护仍能够可靠快速动作。

## 参考文献

- [1] KAZAN H, ORAEE H, PAL B. Assessing the effect of wind farm layout on energy storage requirement for power fluctuation mitigation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(2): 558-568.
- [2] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
- ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [3] 李国庆, 张斌, 肖桂莲, 等. 基于多尺度特征集的高占比新能源电网连锁故障数据驱动辨识方法[J]. 电力建设, 2023, 44(6): 91-100.
- LI Guoqing, ZHANG Bin, XIAO Guilian, et al. Data-driven cascading failure prediction method for high-proportion renewable energy systems based on multi-scale topological features[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(6): 91-100.
- [4] 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.
- [5] 罗隆福, 庞涛, 李勇, 等. 电池储能跟踪发电计划及平抑风电波动的多目标优化控制[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(10): 1-10.
- LUO Longfu, PANG Tao, LI Yong, et al. Multi-objective optimal control of battery energy storage tracking power generation plan and stabilizing wind power fluctuation[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(10): 1-10.
- [6] PAUL S, NATH A, RATHER Z. A multi-objective planning framework for coordinated generation from offshore wind farm and battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2087-2097.
- [7] ZHANG X, GU J, HUA L, et al. Enhancing performances on wind power fluctuation mitigation by optimizing operation schedule of battery energy storage systems with considerations of operation cost[J]. IEEE Access, 2019, 7: 94072-94083.
- [8] CHAKRABORTY T, WASTON D, RODGERS M. Automatic generation control using an energy storage system in a wind park[J]. IEEE Transactions on Power

- Systems, 2018, 33(1): 198-205.
- [9] 张中丹, 皮霞, 杨德州, 等. 电池储能电站替代变电站升级的优化决策配置方法[J]. 电力建设, 2023, 44(7): 41-49.  
ZHANG Zhongdan, PI Xia, YANG Dezhou, et al. Optimal decision-making configuration method for battery energy storage station to replace substation upgrades[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(7): 41-49.
- [10] 韩伟, 刘素梅, 肖超, 等. 计及发电单元故障特性差异的光伏电站短路电流计算模型[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 129-135.  
HAN Wei, LIU Sumei, XIAO Chao, et al. Steady short-circuit calculation model for a photovoltaic station considering different generation units' fault characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 129-135.
- [11] 郑玉平, 吕鹏飞, 李斌, 等. 新型电力系统继电保护面临的问题与解决思路[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 3-15.  
ZHENG Yuping, LÜ Pengfei, LI Bin, et al. Problems faced by relay protection in new power system and their solution ideas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 3-15.
- [12] SONG J, CHEAH M, PRIETO E, et al. Short circuit analysis of AC distribution systems dominated by voltage source converters considering converter limitations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 3867-3878.
- [13] 张家琪, 刘朋印, 谢小荣, 等. 适用于故障特性分析的锂离子电池储能电磁暂态建模方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 166-173.  
ZHANG Jiaqi, LIU Pengyin, XIE Xiaorong, et al. Electromagnetic transient modeling method of lithium-ion battery energy storage system for fault characteristic analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 166-173.
- [14] 李斌, 李博睿, 李超, 等. 考虑过充/过放的电化学储能电站建模及故障特性分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 3-15.  
LI Bin, LI Borui, LI Chao, et al. Modeling and fault characteristic analysis of electrochemical energy storage station considering overcharging/overdischarging[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 3-15.
- [15] 霍启迪, 唐晓骏, 马世英, 等. 不对称短路故障下电池储能影响交流系统短路电流机理及算法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 153-160.  
HUO Qidi, TANG Xiaojun, MA Shiyang, et al. Mechanism and algorithm of short circuit current in AC system affected by BESS under asymmetric short circuit faults[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 153-160.
- [16] BERGER M, KOCAR I, FARANTATOS E, et al. Modeling of Li-ion battery energy storage systems (BESSs) for grid fault analysis[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 196.
- [17] 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.
- [18] 毕天姝, 李彦宾, 贾科, 等. 基于暂态电流波形相关性的新能源场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2012-2019, 2216.  
BI Tianshu, LI Yanbin, JIA Ke, et al. Transient current waveform similarity based pilot protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2012-2019, 2216.
- [19] 贾科, 郑黎明, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的风电场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6263-6274.  
JIA Ke, ZHENG Liming, BI Tianshu, et al. Pilot protection based on cosine similarity for transmission line connected to wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6263-6274.
- [20] 王泽彭, 刘素梅, 张道农. 基于余切相似度的风电场送出线路保护新原理[J]. 可再生能源, 2023, 41(7): 925-933.  
WANG Zepeng, LIU Sumei, ZHANG Daonong. A novel protection strategy based on cotangent similarity for transmission line connected with wind farm[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(7): 925-933.
- [21] GAO H, LI J, XU B. Principle and implementation of current differential protection in distribution networks with high penetration of DGs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 565-574.
- [22] 王珊珊, 吕鹏飞, 张国星. 含分布式电源多点接入的配电网新型纵联保护[J]. 电测与仪表, 2020, 57(4): 49-54, 77.  
WANG Shanshan, LÜ Feipeng, ZHANG Guoxing. New longitudinal protection of distribution network with multi-point access of distributed generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(4): 49-54, 77.
- [23] LIANG Y, PAN C. Time-domain differential protection based on operating and restraining trajectory indices for lines connecting battery storage energy stations[J]. Journal

- of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 12(4): 1074-1086.
- [24] 晁晨棚, 郑晓冬, 高飘, 等. 含高比例光伏配电网的高频阻抗差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 6968-6979.  
CHAO Chenxu, ZHENG Xiaodong, GAO Piao, et al. High frequency impedance differential protection with high proportion of photovoltaic power distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6968-6979.
- [25] 宋国兵, 王晨清, 唐吉斯, 等. 适用于风电接入系统的时域模型识别纵联保护新原理[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3580-3585.  
SONG Guobing, WANG Chenqing, TANG Jisi, et al. Novel pilot protection based on time-domain model identification for wind power integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3580-3585.
- [26] 牛伟民, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 基于正序阻抗幅值比的风电场送出线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 179-187.  
NIU Weimin, FAN Yanfang, HOU Junjie, et al. Pilot protection of wind farm transmission lines based on the positive sequence impedance amplitude ratio[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 179-187.
- [27] JOSHUA A M, VITTAL K P. Protection schemes for a battery energy storage system based microgrid[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 204.
- [28] 武奕彤, 高厚磊, 袁通, 等. 基于特勒根定理的风场送出线路新型纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 117-126.  
WU Yitong, GAO Houlei, YUAN Tong, et al. Novel pilot protection for wind farm transmission lines based on Tellegen's theorem[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 117-126.
- [29] CHEN G, LIU Y, YANG Q. Impedance differential protection for active distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 25-36.
- [30] 王丹枫, 刘素梅, 郑燃, 等. 新能源场站高比例接入下主流类型工频量距离保护比对[J]. 可再生能源, 2024, 42(5): 655-663.  
WANG Danfeng, LIU Sumei, ZHENG Ran, et al. Comparison of manufacturers' power frequency distance protection algorithms with high proportion of renewable energy[J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(5): 655-663.
- [31] 王兴国, 于溯, 周泽昕, 等. 新能源电源控制故障响应与交流线路距离保护影响分析[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 166-173.  
WANG Xingguo, YU Su, ZHOU Zexin, et al. Action analysis of AC line distance protection considering new energy power control response[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 166-173.
- [32] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 42716—2023 电化学储能电站建模导则[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2023.  
State Electricity Regulatory Commission of People's Republic of China. GB/T 42716—2023 guide for modeling of electrochemical energy storage power station[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2023.
- [33] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 34120—2017 电化学储能系统储能变流器技术规范[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2017.  
State Electricity Regulatory Commission of People's Republic of China. GB/T 34120—2017 technical specification for power conversion system of electrochemical energy storage system[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2017.

收稿日期: 2024-05-15; 修回日期: 2024-09-23

作者简介:

刘素梅(1981—), 女, 通信作者, 副教授, 研究方向为含新能源电源电网的保护与控制; E-mail: smliu@bjfu.edu.cn

王丹枫(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为含新能源电源电网的继电保护; E-mail: wangdanfeng@bjfu.edu.cn

韩伟(1975—), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: 1976628@qq.com

(编辑 魏小丽)