

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240358

新能源送出线路工频变化量距离保护不正确动作机理分析

戴志辉, 韦舒清, 柳梅元

(河北省分布式储能与微网实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 大规模新能源经交流联络线送出已成为新型电力系统的典型场景。在此背景下, 受新能源系统运行方式的影响, 工频变化量距离保护存在不正确动作风险。为进一步探究工频变化量距离保护性能下降机制, 基于电压平面分析可知, 在光伏场站控制策略的作用下, 光伏场站馈出正序电流表征为相位、幅值皆受控的非线性变量, 造成保护补偿电压大小随故障工况变化且矢量方向发生不确定性偏转, 导致保护动作可行域不明确, 从而造成基于传统整定判据下的阻抗继电器性能严重劣化。在此基础上, 借助距离保护正确动作边界条件与光伏场站接入容量的对应关系, 提出了保护适用性快速评估与保护失效边界接入容量计算方法。基于 PSCAD/EMTDC 建立了光伏场站送出系统仿真模型, 通过大量仿真验证了理论分析的正确性。

关键词: 距离保护; 工频变化量; 相间阻抗继电器; 不正确动作

Analysis of the incorrect operation mechanism of power frequency variation-based distance protection in new energy transmission lines

DAI Zhihui, WEI Shuqing, LIU Meiyuan

(Hebei Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid (North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: Large-scale integration of new energy through AC interconnection lines has become a typical scenario in modern power systems. In the present situation, because of the influence of the operation mode of new energy systems, power frequency variation-based distance protection faces the risk of incorrect operation. To further investigate the performance degradation mechanism of this protection method, voltage plane analysis reveals that under the control strategy of photovoltaic (PV) power stations, the positive-sequence current at the PV station output exhibits phase- and magnitude-controlled nonlinear characteristics. This causes the protection compensation voltage to vary with fault conditions, with its vector direction undergoing uncertain deviations, leading to an unclear operating region for protection operation. Consequently, the performance of impedance relays based on traditional setting criteria is severely degraded. On this basis, leveraging the relationship between the boundary conditions for correct operation in distance protection and the PV station's integration capacity, a method for rapid assessment of protection applicability and calculation of the integration capacity value at the boundary of protection failure is proposed. A PSCAD/EMTDC simulation model of the distribution network is established, and the correctness of the theoretical analysis are validated through extensive simulations.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877084).

Key words: distance protection; power frequency transient quantity; phase-to-phase impedance relay; incorrect operation

0 引言

构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统是新型能源体系的重要组成和实现“双碳”目标的关键

载体^[1]。根据现有规划, 预计十四五期间, 我国中东部地区将新增光伏 1 亿 kW 左右。随着新能源电力资源大规模配置, 大规模新能源经汇集后, 通过交流联络线送出成为新型电力系统的典型场景。

对于送出线路, 其现有保护策略以纵联保护、距离保护为主^[2]。其中, 新能源侧短路电流呈现幅

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877084)

值受限、相位受限特性是影响现有纵联保护性能的主要因素^[3-4]。为此, 国内外专家学者提出了众多新型保护方案, 包括基于电气量纵联保护和基于逻辑量纵联保护^[5]。其中, 基于逻辑量纵联保护主要是将本侧功率方向、测量阻抗故障判别结果传输给对侧, 基于两侧信号实现区内外故障判别, 但该方法对保护对端通信同步性要求较高, 难以适应新能源送出场景^[6]; 基于电气量的纵联保护根据保护两侧电流改进保护判据, 其始终受新能源渗透率的制约^[7]。距离保护作为 220 kV 电压等级交流联络线路的后备保护, 其性能对新能源并网系统的可靠运行至关重要^[8]。关于工频变化量距离保护适应性分析方面, 目前规模化新能源接入对距离保护的影响已有一些研究结果。文献[9]研究了光伏送出线路场站侧工频变化量距离保护的動作性能, 但相关结论过于依赖仿真, 缺乏理论依据。文献[10]以风电场送出线的工频变化量距离保护作为研究对象, 指出保护背侧阻抗特征的变化是导致工频变化量距离保护存在误动风险的主要原因, 但相关结论是基于风电系统阻抗固定不变的假设, 没有考虑到文献[11]中揭示的风电系统内阻抗实时变化带来的影响。文献[12]指出交直流混联系统送出线工频变化量距离保护, 其保护范围会随直流系统等值阻抗增大而缩小, 不过在分析过程中未充分考虑相角对保护的影响。为此, 文献[13]考虑了不同工况下直流系统等值阻抗的影响, 指出在交直流输电系统交流送出线故障情况下, 直流等值系统的等值阻抗大部分情况下呈容性, 造成在新能源接入场景下工频变化量距离保护性能较差, 该文献并未对保护性能劣化的根本原因进行深入剖析, 存在一定的局限性。

综上, 工频变化量距离保护作为工程中配置较普遍的距离保护, 现有研究并未锚定保护性能劣化的主要原因, 仍然无法针对性地对保护性能补短与强化, 现有文献[14]利用高频段内保护背侧等值阻抗恒定的原理, 提出高频变化量距离保护, 利用小波变换快速实现保护出口。另一方面, 针对工频变化量距离保护适应性的问题, 现有研究多聚焦于新能源经柔直送出系统, 且主要为定性分析, 明确的保护动作边界有待进一步研究。

针对上述问题, 本文以光伏场站送出线路配置的工频变化量距离保护为研究对象, 分析了光伏场站故障时输出电流正序分量幅相特征, 借助电压跌落系数对不同运行状态下的光伏场站馈出电流相角进行可视化处理, 利用电压平面分析了电流初相角变化对距离保护动作特性的影响, 并提出了距离保护失效边界接入容量计算方法, 为保护适用性快速

评估提供了理论基础。利用 PSCAD/EMTDC 建立光伏场站送出系统的仿真模型, 从理论和仿真角度验证了光伏场站交流送出线路距离保护性能劣化机理及其接入边界容量。所得结论可为新型电力系统典型场景下继电保护适用性研究及优化配置提供一定的理论指导。

1 光伏场站故障响应特性分析

典型光伏场站并网系统拓扑结构如附录 A 图 A1 所示^[15]。图 A1 中: \dot{U}_{PCC} 为光伏场站并网点电压; \dot{U}_m 、 \dot{I}_m 分别为 M 侧电压、电流; \dot{I}_n 为 N 侧电流; \dot{E}_n 、 Z_n 分别为常规系统的电动势和阻抗; i_d^+ 、 i_q^+ 和 i_d^- 、 i_q^- 分别为光伏场站馈出电流 d 、 q 轴正负序分量; 上标“*”表示参考值。系统具体参数详见附录 A。

光伏场站并网运行时, 采用以正序分量主导的恒功率控制策略保持恒功率因数运行。为避免故障发生后电源离网造成系统功率不平衡, 国家规定, 光伏场站在故障时需要向电力系统注入动态无功电流, 其故障时通常采用低压穿越策略^[16]。即为响应无功支撑策略, 无功电流将根据并网点电压实际跌落幅度抬升, 以期提供稳定的无功支撑。考虑到逆变器电流有最值限制, 光伏场站馈出电流将被钳制在 I_{lim} 内, 本文考虑 I_{lim} 最大可达额定电流 I_N 幅值的 1.2~2 倍^[17]。此外, 为了抑制不对称故障下馈出电流中含有的负序分量, 逆变型电源常配置负序电流抑制策略^[18]。综上, 其控制正序内环参考值 i_d^{+*} 、 i_q^{+*} 应满足式(1)和式(2)^[19-20]。

$$i_d^{+*} = \begin{cases} \frac{2P_{\text{dc}}}{3\gamma U_N} & \gamma > 0.458 \\ \frac{2\sqrt{(I_{\text{lim}} S_N / I_N)^2 - [1.5\gamma(0.9 - \gamma)]^2}}{3\gamma U_N} & 0.2 \leq \gamma \leq 0.458 \\ 0 & \gamma < 0.2 \end{cases} \quad (1)$$

$$i_q^{+*} = \begin{cases} \frac{0.9 - \gamma}{U_N} & 0.9 \leq \gamma \leq 0.2 \\ 1.05 I_N & \gamma < 0.2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_N 为并网点额定电压; γ 为并网点电压跌落系数, $\gamma = U_{\text{PCC}}^p / U_N$, 其中 U_{PCC}^p 为并网点正序电压; P_{dc} 为系统正常运行时光伏场站输出有功功率基准值; I_{lim} 为逆变器最大允许电流; S_N 为额定容量; I_N 为额定相电流幅值。

将式(1)、式(2)代入式(3), 可计算出光伏场站侧

馈出短路电流初相角 φ_1 为

$$\varphi_1 = \arctan \frac{i_q^{+*}}{i_d^{+*}} \quad (3)$$

由式(1)一式(3)可知, 光伏场站馈出电流幅值与初相角均受不同故障工况下光伏场站运行方式变化的影响, 无法以恒定形式存在, 具有典型的非线性受控特征。

2 系统运行方式对距离保护影响机理分析

由第 1 节分析可知, 系统运行状态和故障工况对并网点电流初相角和幅值影响繁杂, 本节将详细分析上述参量变化对补偿电压的影响, 剖析光伏场站接入下该保护可靠性下降机理。

2.1 工频变化量距离保护

工频变化量距离保护利用工频附加分量电流、电压判别故障, 其动作判据^[21]可表示为

$$|\Delta \dot{U}_{op}| \geq k_{rel} U_N \quad (4)$$

式中: $\Delta \dot{U}_{op}$ 为保护处故障前补偿电压 \dot{U}_{op} 和故障后补偿电压 \dot{U}'_{op} (上标“'”表示故障时的电气量, 后同)的差值, 即 $\Delta \dot{U}_{op} = \dot{U}_{op} - \dot{U}'_{op}$, 针对相间故障, $\Delta \dot{U}_{op\phi\phi} = \Delta \dot{U}_{\phi\phi} - \Delta \dot{I}_{\phi\phi} Z_{set}$ ($\phi\phi = AB、BC、AC$), 针对接地故障, $\Delta \dot{U}_{op\phi} = \Delta \dot{U}_{\phi} - \Delta \dot{I}_{\phi} Z_{set}$ ($\phi = A、B、C$), 其中 Z_{set} 为阻抗整定值; k_{rel} 为可靠系数, 一般取 1.1~1.2。

以附录 A 图 A1 区内 f_1 点发生 AB 两相短路故障为例, 假设故障前系统处于空载状态, 则 M 侧 AB 相间阻抗继电器的补偿电压差值 $\Delta \dot{U}_{op}$ 表示为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{op} &= \dot{U}_{op} - \dot{U}'_{op} = \\ & [\dot{E}_m - \dot{I}_m (Z_S + Z_{set})] - \dot{I}'_m (Z_m - Z_{set}) = \\ & [\dot{E}_m - \dot{I}_m (Z_S + Z_{set})] - \dot{E}_m \frac{(Z_m - Z_{set})}{(Z_S + Z_m)} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: \dot{E}_m 为保护背侧电源的相间电压; Z_m 为测量阻抗; Z_S 为系统阻抗。

对比式(5)可知, 常规电源在故障达到稳态时, 区内故障时 \dot{U}_{op} 与 \dot{U}'_{op} 相位相反, 即 $|\dot{U}_{op} - \dot{U}'_{op}| > |\dot{U}_{op}|$, 易知 $|\dot{U}_{op}| = |U_N|$, 所以 $|\dot{U}_{op}| > k_{rel} U_N$, 保护能可靠动作, 区外故障分析思路相似, 考虑一定裕度, 上述动作特性如附录 A 图 A2 所示。

但当其应用于光伏场站送出线路时, 由于送出线路并网逆变器配置快速响应的故障穿越控制策略, 其低压穿越期间输出的有功、无功功率会根据实际电压跌落幅度迅速变化, 在不同的系统运行方

式下, \dot{U}'_{op} 的相位会以水平方向为轴发生不确定性偏转, 相间距离保护动作特性也不尽相同, 为证明这点, 下面结合电压平面进行详细分析。

2.2 光伏场站不同运行方式对补偿电压影响机理

根据变压器变比将附录图 A1 转化为图 1。图 1 中, \dot{U}_S 为经等效变换后光伏系统控制点电压(本文假设控制点在变压器之前); Z_T 为控制点至保护安装处等效阻抗(变压器和联络线阻抗之和)。

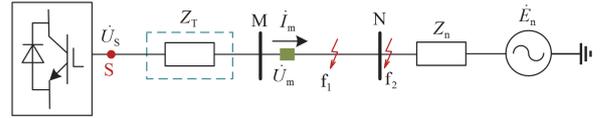


图 1 光伏场站并网系统等效拓扑

Fig. 1 Equivalent topology of the photovoltaic field station grid connection system

系统正常状态下光伏场站处于恒功率因数运行状态, 控制点正序电压 \dot{U}_{S1} 与 M 侧正序电流 \dot{I}_m 近乎同相位, 根据 $\arg Z_T \approx 90^\circ$ 的假设, 可以推导出 \dot{I}_m 、 \dot{U}_{op} 、 \dot{U}_m 在电压平面的分布如图 2(a)所示。在此假设 M 侧正序电压 \dot{U}_{m1} 滞后于 \dot{I}_m 的相位为 δ , 故障前 δ 值与 Z_T 有关, 记变压器的等值短路阻抗为 10%, $\delta \approx \arcsin 0.10 = 5.74^\circ$ 。

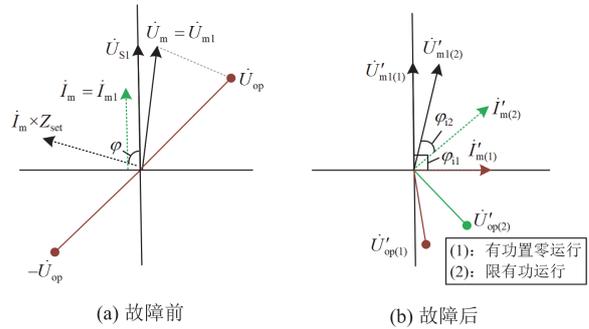


图 2 故障前、后补偿电压相位变化

Fig. 2 Phase shift between pre-fault and post-fault compensation voltage

区内 f_1 点发生相间故障复合序网如图 3 所示。

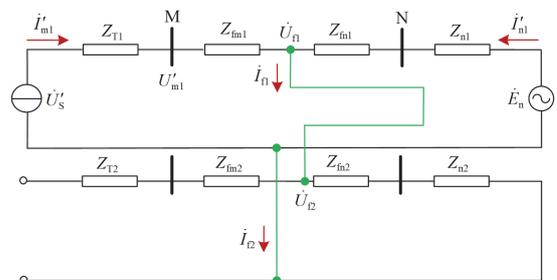


图 3 复合序网图

Fig. 3 Composite sequence network diagram

图3中, Z_{fm} 为故障点到M侧保护的线路阻抗; Z_{fn} 为故障点到N侧保护线路阻抗; \dot{U}_f 、 \dot{I}_f 为故障点电压及电流; 下标1、2分别表示正序、负序分量。基于图3, \dot{U}_{f1} 表达式如式(6)所示。

$$\begin{cases} \dot{U}_{f1} \approx \frac{\dot{E}_n Z_{\Sigma}}{Z_{n1} + Z_{f1} + Z_{\Sigma}} \\ Z_{\Sigma} \approx (Z_{fn2} + Z_{n2}) \parallel (-\dot{U}'_{m1} / \dot{I}'_{m1} + Z_{fm1}) \end{cases} \quad (6)$$

式中, Z_{Σ} 为故障时等值阻抗。

由式(6)分析可得, 此时 \dot{U}_{f1} 的相位主要与 δ 有关, 而故障后 δ 的取值由逆变器馈出正序电流的初相角 φ_1 决定。经典的双矢量控制策略的响应速度一般在 10 ms 以内^[22], 可认为故障发生时并网逆变器迅速进入稳态, 故障期间电流初相角可根据式(1)一式(3)理论计算得到, 根据文献[23], 后续将分为有功置零、限有功功率与定有功功率3种故障运行方式对 \dot{U}'_{op} 矢量变化特性进行详细分析。

1) 当 $\gamma < 0.2$ 时, 光伏场站处于“有功置零”运行状态, 输出功率主要通过无功电流支撑, 故障后 \dot{I}'_{m1} 滞后于 \dot{U}'_{s1} 相位近 90° 。进一步可得: $\dot{I}'_{m1} Z_T$ 、 $\dot{I}'_{m1} Z_{fm}$ 与 \dot{U}'_{s1} 相位近似相同, 因此 \dot{U}'_{s1} 、 \dot{U}_{f1} 和 \dot{U}'_{m1} 同相位。由式(6)可知, 该运行方式下 $\arg Z_{\Sigma}$ 接近 90° , $\arg \dot{U}_{f1}$ 接近 0° 。可以推导出 \dot{I}'_m 、 \dot{U}'_{op} 、 \dot{U}'_m 在电压平面的分布如图2(b)所示。对比图2(a)、图2(b)可知, 故障后 \dot{U}'_{op} 相位以水平为轴向上偏移, 不再与 \dot{U}_{op} 相位相反。

2) 当 $0.2 \leq \gamma \leq 0.458$ 时, 故障期间光伏场站处于“限有功”运行方式。此时电流初相角为

$$\varphi_1 = \arctan \frac{\dot{i}_q^{+*}}{\dot{i}_d^{+*}} = \arctan \frac{1}{\sqrt{(NS_N / 1.5\gamma(0.9 - \gamma))^2 - 1}} \quad (7)$$

此时 \dot{I}'_{m1} 相位滞后于 \dot{U}'_{s1} , \dot{U}'_{m1} 仍可用 \dot{U}_{f1} 近似, 根据 $-\dot{U}'_{m1} / \dot{I}'_{m1}$ 较大且大于 $Z_{fn2} + Z_{n2}$ 的实部可得, $(Z_{fn2} + Z_{n2}) \parallel (-\dot{U}'_{m1} / \dot{I}'_{m1})$ 实际幅值很大且位于第一象限, 因此基于式(6)可知 $\arg \dot{U}_{f1} < 0^\circ$ 。对比图2(a)、图2(b)可知, \dot{U}'_{op} 相角显著减小, 不再与 \dot{U}_{op} 相位相反, 图2(b)所示“有功置零”工况下 \dot{U}'_{op} 相位相比“限有功”工况下偏移较小。

3) 当 $0.458 < \gamma \leq 0.9$ 时, 故障期间, 光伏场站处于定有功运行状态, 此时电流初相角为

$$\varphi_1 = \arctan \frac{\dot{i}_q^{+*}}{\dot{i}_d^{+*}} = \arctan \frac{1.5\gamma(0.9 - \gamma)}{\sqrt{3}P_{dc}} \quad (8)$$

其分析与2)基本相同, 此时 \dot{I}'_{m1} 滞后 \dot{U}'_{s1} 的角度

受并网点电压跌落程度、光伏输出功率影响。

2.3 距离保护不正确动作机理分析

根据2.2节分析可知, \dot{U}'_{op} 的相位与电流初相角密切相关, 现对故障期间不同运行方式下的相间阻抗继电器的适用性进行分析。本文采用归一化动作值 $\Delta \dot{U}_{opn}$ 定量评估保护的适用性, $\Delta \dot{U}_{opn}$ 越大说明保护可靠性越好, $\Delta \dot{U}_{opn}$ 越接近 0 说明保护可靠性越差, 本节将 $\Delta \dot{U}_{opn}$ 定义为

$$\Delta \dot{U}_{opn} = \left| 1 - \frac{\Delta \dot{U}_{op}}{k_{rel} U_N} \right| \quad (9)$$

以图3所示 f_1 点发生 AB 两相故障为例, 以便更清晰地揭示不同运行方式对保护性能的影响, 本文选取 M 侧正序电压为参考相位进行分析, 为后续确定距离保护正确动作容量边界奠定基础。

光伏场站不同运行方式、不同接入容量条件下, 工频变化量距离保护动作情况如图4所示。图4中: 子图(a1)、(b1)、(c1)和(a2)、(b2)、(c2)分别为电压跌落系数“ $\gamma < 0.2$ ”、“ $0.2 \leq \gamma \leq 0.458$ ”、“ $0.458 < \gamma \leq 0.9$ ”对应不同运行方式的区内和区外故障。

1) 当 $\gamma < 0.2$ 时, 光伏场站处于“有功置零”的运行方式。区内故障时, 由图4(a1)、图4(a2)所示, 光伏场站馈出的短路电流理论上加强了沿线补偿电压分布差异, 有助于距离保护正确动作, 因此区内、外故障均处于可靠工作状态。

2) 当 $0.2 \leq \gamma \leq 0.458$ 时, 光伏电站处于“限有功”的运行方式, 在此运行方式下, 光伏场站馈出电流幅值抬升, 相位发生逆时针旋转, 使得 \dot{U}'_{op} 相位更偏向于第一象限。由图4(b1)中红色矢量可知, 区内故障时, 光伏场站接入容量的增大令 \dot{U}'_{op} 相位偏移愈严重, 使得区内相间故障后动作结果落在圆内的概率增大, 不但区内故障时保护拒动风险增大, 更会导致区外故障后保护发生超越现象。

3) 当 $0.458 < \gamma \leq 0.9$ 时, 光伏场站处于“定有功”的运行方式, 在此运行方式下, 光伏电站 d 轴馈出电流幅值和初相角受稳定运行时输出功率的箝位, 这种情况下虽然能够削弱光伏场站带来的影响, 但同样会使 \dot{U}'_{op} 的相位偏向第一象限。区内外故障时, 由图4(c1)、图4(c2)中的红色矢量可得, 其保护性能受电压跌落系数的影响, 值得提出的是, 当并网点电压跌落较大时, 系统增发的无功较大, 此时相间阻抗继电器的可靠性较高。

综上所述可得以下结论: 不同故障工况下, 光伏场站运行方式随机, 光伏场站馈出的电流初相角发生变化。当电流初相角为任意锐角时, 在电压平面上, 区内故障后补偿电压矢量会逆时针偏向第一

象限, 造成工作电压幅度降低; 区外故障后补偿电压矢量会逆时针偏向第三象限, 造成工作电压幅值增大, 导致相间故障时阻抗继电器的可靠性下降。但值得指出的是, 限有功运行方式时, 其电流初相角较小, \dot{U}'_{op} 的相位偏移较多, 相间继电器误判概率更大。特别是当相间阻抗继电器应用于光伏场站

接入容量较大的场景时, 其可靠性会进一步降低。

在接地故障下, 由于系统存在零序支路, \dot{U}_r 不会深度跌落; 再者, 零序电流相位不受系统运行方式影响, 在零序电流的相位补偿下, 其馈出电流初相角较大, \dot{U}'_{op} 矢量偏转较小, 距离保护可靠性相对较高, 其理论推导与仿真测试见附录 B。

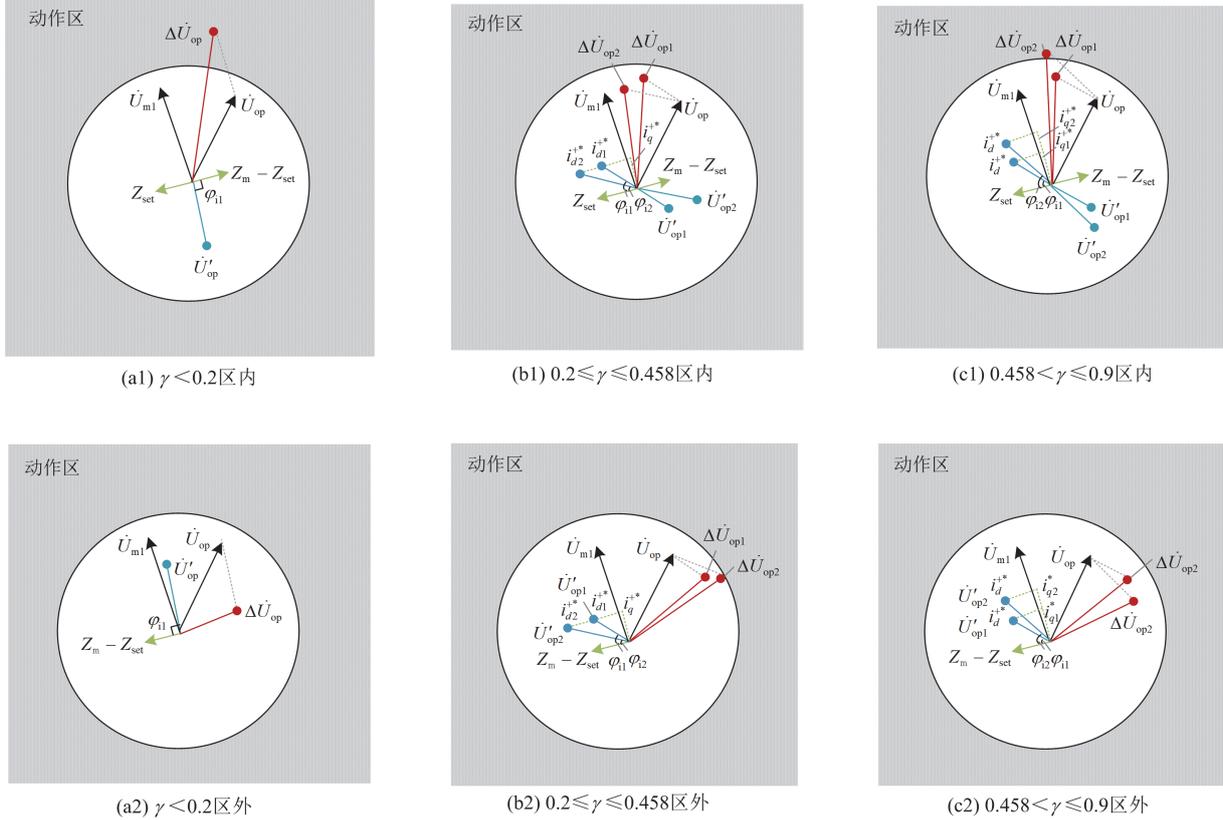


图 4 不同运行状态对相间阻抗继电器的性能影响

Fig. 4 Performance impact of different operating states on the interphase impedance relay

2.4 距离保护正确动作的边界

结合 2.3 小节分析可知, 距离保护的動作特性受光伏场站接入容量约束, 随着光伏场站接入容量增加, 距离保护存在不正确动作风险。为此, 本节将进一步明确距离保护正确动作的内在容量边界。

由式(4)可得在光伏接入容量的影响下, 发生相间故障时距离保护正确动作边界条件为

$$\left| (\dot{U}_m - \dot{U}'_m) - (\dot{I}_m - \dot{I}'_m)Z_{set} \right| = k_{rel}U_N \quad (10)$$

假设逆变器最大允许电流 I_{lim} 为 NI_N , 通过式(1)一式(3), 故障时光伏场站提供的短路电流 \dot{I}'_m 近似如式(11)所示。

$$\dot{I}'_m = N \frac{2S_N}{3U_N} \angle \varphi_1 \quad (11)$$

式中, N 为常数, 通常取 1.2~2。

由式(11)可知, 故障后光伏场站的接入容量与馈出电流的幅值成正比, 前文分析 φ_1 与电压跌落系数密切相关; 此外, 由式(7)可知, φ_1 也会随容量增加而有所变化, 但总体上变化范围较小, 可以忽略不计, 证明过程见附录 C。

故障前光伏输出电流为逆变器电压外环指令值 i_d^{*} , 上限值可设置为 I_N , 考虑光伏故障前出力水平, 假设 $\dot{I}_m = \alpha I_N = 2\alpha S_N / (3U_N)$, α 为出力水平参数, 即故障前输出电流取决于正常运行时有功出力, 本节中 α 取 1, 证明过程见附录 D。

联立式(10)和式(11), 由距离保护正确动作边界条件可得出, 距离保护能够正确动作的光伏场站接入容量应满足式(12)。

$$\begin{cases} aS_{N-\max}^2 + bS_{N-\max} + c = 0 \\ a = 4N^2|Z_{\text{set}}|^2/(9U_N^2) + 4|Z_{\text{set}}|^2/(9U_N^2) - 2|Z_{\text{set}}|^2/(3U_N) \cdot \\ \quad (2N/(3U_N)e^{j\varphi} + 2N/(3U_N)e^{-j\varphi}) \\ b = (1-\gamma)U_N Z_{\text{set}} (2N/(3U_N)e^{j\varphi} - 2N/(3U_N)e^{-j\varphi}) \\ c = |(1-\gamma)U_N|^2 - k_{\text{rel}}^2 U_N^2 \end{cases} \quad (12)$$

其解析解为

$$S_{N-\max} = \frac{D(2 - (\dot{A} - \dot{A}^*)^2) \pm C\sqrt{4(-4B^2 + (\dot{A} + \dot{A}^*)^2)}}{4B^2 - (\dot{A} + \dot{A}^*)^2} \quad (13)$$

式中: 复数 $(\dot{A} + \dot{A}^*)^2 = N(e^{-j\varphi} + e^{j\varphi})$; $B^2 = N^2/4 + 1/4$; $C = 2U_N Z_{\text{set}} \sqrt{(1-\gamma)^2 - k_{\text{rel}}^2}$; $D = -(1-\gamma)Z_{\text{set}}$; $(\dot{A} - \dot{A}^*)^2 = N(e^{-j\varphi} - e^{j\varphi})$; $S_{N-\max}$ 为光伏场站的边界接入容量。

由式(13)可知, 在故障类型和位置确定时, 复数 \dot{A} 和常数 B 均为定值, $S_{N-\max}$ 存在两个解析解。

下面对 $S_{N-\max}$ 的无效解进行辨论: 假设 \dot{A} 实部和虚部分别为 $\text{Re}(\dot{A})$ 和 $\text{Im}(\dot{A})$, $4(-4B^2 + (\dot{A} + \dot{A}^*)^2)$ 必须大于 0, 即 $\text{Re}(\dot{A})^2 > B^2$ 。因为复数 \dot{A} 幅值恒大于 0, 所以 $\text{Im}(\dot{A})$ 正负主要与其相角有关, 而 \dot{A} 的相角通常小于 0。在此情况下, $\text{Im}(\dot{A}) < 0$, 若 $|\dot{A}|^2 > |B|^2$, $\text{Im}(\dot{A}) > \sqrt{|B|^2 - \text{Re}(\dot{A})^2}$, 式(13)取值无意义; 若 $|\dot{A}|^2 < |B|^2$, $\text{Im}(\dot{A}) < \sqrt{|B|^2 - \text{Re}(\dot{A})^2}$, 式(13)取值一正一负。因此可推导适应边界容量如式(14)所示。

$$S_{N-\max} = \frac{D(2 - (\dot{A} + \dot{A}^*)^2) - C\sqrt{4(-4B^2 + (\dot{A} + \dot{A}^*)^2)}}{(4B^2 - (\dot{A} + \dot{A}^*)^2)} \quad (14)$$

式(14)表明, 光伏场站的边界接入容量主要受两个因素制约: 1) 故障位置; 2) 送出交流线路的电压等级。从距离保护适用性的角度分析, 前述两个因素通常为已知量, 即以 ρ 为横坐标, $S_{N-\max}$ 为纵坐标, $\rho = Z_m/Z_L$ 。根据式(14)可直接绘制保护失效边界容量曲线, 如图 5 所示, 可得出阻抗继电器在不同故障电气距离下所能接入的最大光伏场站容量。即使光伏场站的无功支撑策略发生变化, 式(14)所描述的边界容量解析模型也近似不变, 因此适用于不同运行方式的光伏场站。这为光伏场站接入线路距离保护适用性评估提供了理论支撑。

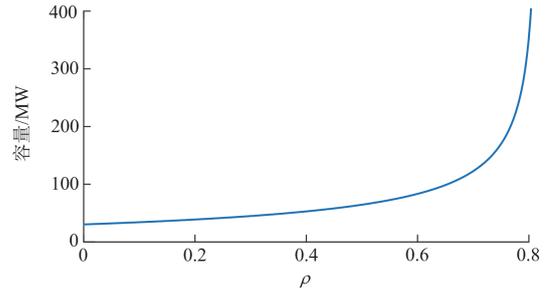


图 5 保护失效边界容量曲线

Fig. 5 Protection failure boundary capacity curve

在阻抗继电器整定范围内, 对保护失效边界容量曲线进行积分, 定义保护失效边界容量曲线下的面积除以阻抗整定值 Z_{set} 为继电器的保护失效系数 f_{ac} , 其表达式为

$$f_{\text{ac}} = \frac{\int_0^{Z_{\text{set}}} f(\rho) d\rho}{Z_{\text{set}}} \quad (15)$$

式中, Z_{mn} 为 M 侧到 N 侧保护的线路阻抗。

综上, 该保护失效边界容量理论的计算流程如图 6 所示。

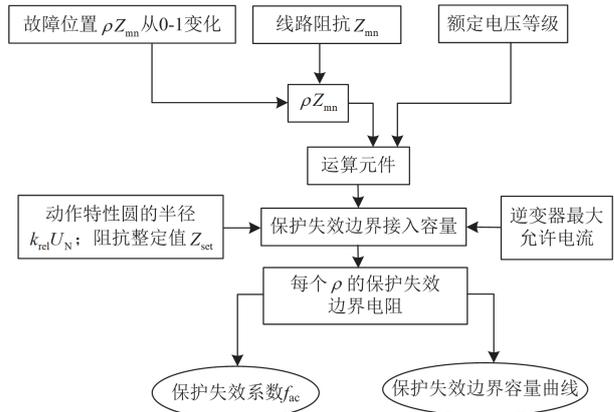


图 6 保护失效边界容量理论计算流程图

Fig. 6 Protection failure boundary theory calculation flow chart

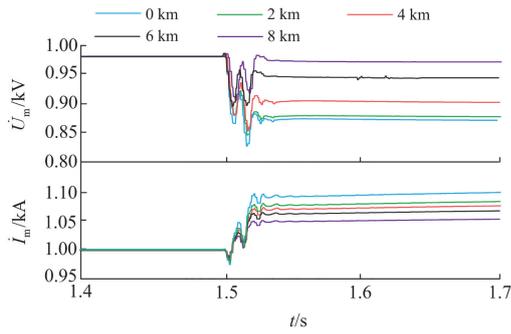
3 仿真分析

3.1 系统参数

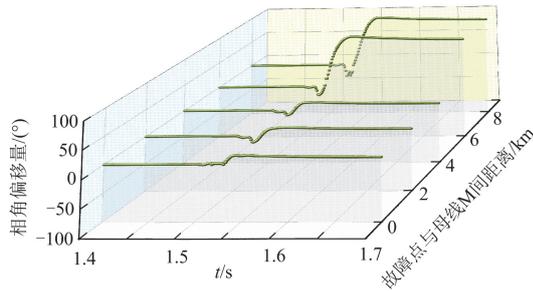
为测试光伏场站送出线路距离保护的适用性, 参考某省光伏场站数据, 在 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建了如附录 A 图 A1 所示的电网模型, 系统具体参数详见附录 A。

3.2 不同故障工况下馈出电流分量对比

当线路 MN 发生 AB 相间故障时, 线路首端(M 侧)与故障点之间的电气距离区间为 0~8 km。当送出线路发生相间短路故障时, 光伏电源响应特征如图 7 所示。



(a) 不同位置故障时保护安装处电压及电流波形



(b) 不同位置故障时保护安装处正序电流初相角偏移量

图 7 相间故障时光伏电源响应特征

Fig. 7 Photovoltaic power supply response characteristics in case of phase-to-phase fault

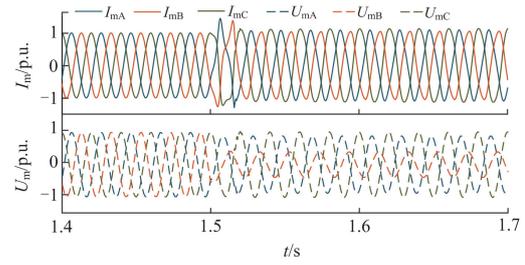
图 7(a)表示上述线路在不同位置故障时保护安装处的电压、电流波形；图 7(b)表示上述线路在不同位置故障时电流初相角偏移量。由图 7(a)可得：故障前并网逆变器恒功率运行，对外表征为仅输出有功功率。1.5 s 区内线路发生故障，当故障进入稳态后，其电流幅值具有典型的非线性受控特征。由图 7(b)可得：故障距离越远其对应的并网点电压跌落程度越小，此时正序电流初相角偏移越大。综上，光伏场站馈出电流幅值与初相角均受不同故障工况下光伏场站运行方式变化的影响，与理论分析一致。

3.3 工频变化量阻抗继电器性能测试

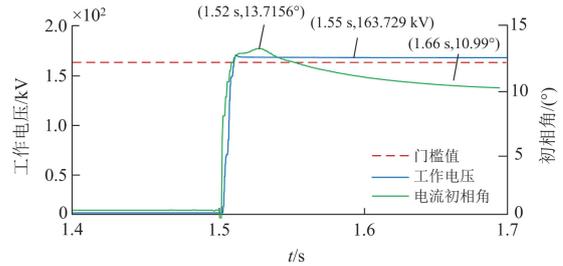
对不同场景下的故障进行仿真，AB 两相故障发生时间为 1.5 s，持续时间为 200 ms。区内故障点 f_1 为线路中点，区外故障点 f_2 为线路末端。区内故障仿真结果见图 8，区外故障仿真结果见图 9。可靠系数 K_{rel} 取 1.2，距离保护动作门槛为 160.8 kV。

3.3.1 区内故障测试结果

由图 8 可知：当区内中点发生相间故障时，其并网点电压为 0.735 p.u.，处于定有功功率运行状态。工频变化量的相间阻抗继电器的工作电压约为 163.729 kV，十分接近动作边界 160.8 kV，其可靠性较差。



(a) 保护安装处的电压、电流信号



(b) 电流初相角及距离保护工作电压

图 8 区内故障测试结果

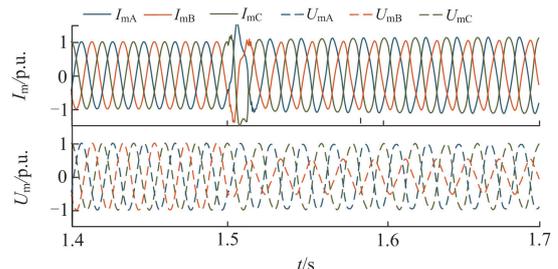
Fig. 8 Test results within the area

低压穿越故障期间，电流初相角如图 8(b)绿线所示。故障前，近似为 0° ，故障后先升到 13.7156° ，而后逐渐稳定在 10.99° 。根据式(10)计算得到的电流初相角为 13.49° ，与仿真结果近似相等，表明电流初相角理论分析正确。

3.3.2 区外故障测试结果

根据图 9 可知：区外末端发生相间故障时，其并网点电压为 0.74 p.u.，处于定有功功率运行状态。工频变化量保护的工作电压为 157.9 kV，十分接近保护边界。当加入信噪比为 20 dB 的高斯白噪声后，如图 9(b)所示，工作电压会进入到动作区间内，易造成保护超越现象，这说明区外适应性分析理论正确。

在区内、区外发生相间短路故障时，相间阻抗继电器的工作电压十分接近保护边界，其可靠性大大降低；在区内发生相间短路故障时 M 侧阻抗继电器的归一化动作值计算结果为 0.0182，区外发生相间短路故障时为 0.0210，均趋近于 0，两者相互印证所提适用性指标的有效性。



(a) 保护安装处的电压、电流信号

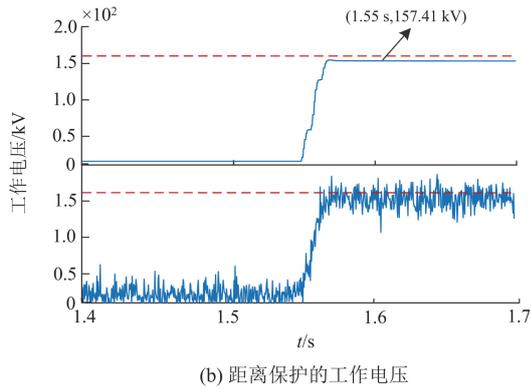


图9 区外故障测试结果

Fig. 9 Test results from external sources

3.4 不同光伏场站接入容量下阻抗继电器性能测试

由 2.3 节分析可知: 不同接入容量条件下, 工频变化量距离保护性能差异显著, 为验证本文理论分析的正确性, 更改光伏电场接入容量进行正向相间故障的测试, 不同容量下保护的動作情况如表 1 所示。此外, 相间阻抗继电器的保护失效边界容量曲线如 2.4 节图 5 所示, 它描绘了 M 侧继电器在不同故障位置上的保护失效边界接入容量。

从图 5 可知, 对于 M 侧相间阻抗继电器来说, 随着故障距离的增大, 保护失效边界接入容量呈非线性变化, 在线路首端缓慢增大, 在线路末端达到最大值。

根据表 1 可知:

1) 前文理论计算得出, AB 两相相间短路故障下, 光伏电站的边界接入容量为 82.86 MW。仿真结果表明, 当区内、区外发生相间短路故障, 同时光伏场站容量低于边界接入容量理论计算值时, 其工作电压会低于(高于)动作值, 进一步验证本文所推导的式(14)能较准确地计算光伏电站边界接入容量, 可为评估距离保护的适应性提供理论依据。

2) 对于三相短路, 其电压跌落系数均小于 0.2, 光伏场站处于“有功置零”运行状态, 相比于其他运行状态, 其在区内、区外故障情况下可靠性指标均保持较高水平, 验证了在电压跌落系数小于 0.2 (有功置零)时保护可靠性最高, 且基本不受接入容量的影响。

3) 不同光伏场站接入容量下, 保护的适应性存在明显差异。根据仿真结果可知, 光伏场站接入容量越大, 其保护失效系数越大, 相间阻抗继电器的保护可靠性会逐渐降低。

4) 对于 f_1 点相间短路故障时, 其并网点电压有效值约为 0.735 p.u., 对于 f_2 点相间短路故障, 其

表 1 不同容量下保护的動作情况

Table 1 Protection action under different capacities					
接入容量/ MW	故障 位置	故障 类型	工作电压/ kV	f_{ac}	可靠系数
40	f_1 区内	三相	195.28	0.063	0.214
		相间	163.73		0.018
		单相	162.81		0.012
	f_2 区外	三相	137.83		0.143
		相间	157.41		0.021
		单相	133.70		0.168
60	f_1 区内	三相	192.15	0.15	0.194
		相间	163.57		0.017
		单相	162.63		0.011
	f_2 区外	三相	139.38		0.133
		相间	159.24		0.009
		单相	133.81		0.167
80	f_1 区内	三相	189.47	0.18	0.178
		相间	160.91		0.004
		单相	162.14		0.008
	f_2 区外	三相	142.05		0.116
		相间	160.89		0.0006
		单相	134.00		0.166
100	f_1 区内	三相	184.03	0.22	0.144
		相间	158.79		0.012
		单相	161.95		0.013
	f_2 区外	三相	142.91		0.111
		相间	162.60		0.011
		单相	134.17		0.165
120	f_1 区内	三相	180.53	0.28	0.12
		相间	154.12		0.041
		单相	161.09		0.0018
	f_2 区外	三相	144.58		0.101
		相间	167.99		0.045
		单相	134.45		0.163

并网点电压有效值为 0.74 p.u., 上述两种故障情况下归一化动作值计算结果分别为 0.021、0.018, 验证了当电压跌落系数在 $0.458 < \gamma < 0.9$ 、“定有功”运行状态时, 并网点电压跌落越少, 其阻抗继电器的可靠性越低。

上述测试结果与理论分析吻合, 实验数据表明, 当发生故障后, 光伏场站处于“有功置零”运行状态时, 其与工频变化量距离保护最为适配。若光伏场站处于“定有功”或“限有功”运行状态时, 相间故障时阻抗继电器的可靠性会降低。但只要保证光伏场站接入容量小于理论计算值, 工频变化量距离保护的适用性会大大提高。

4 结语

本文深入分析了工频变化量距离保护性能下降机理, 并进一步确定了保护正确动作的内在容量边

界，具体结论如下。

1) 通过电压平面分析了工频变化量距离保护受光伏电站运行方式影响造成保护性能劣化机制：故障时光伏场站馈出的电流幅值与相位的变化，改变原有故障后补偿电压对于动作结果的影响，区内故障时保护会面临拒动风险，区外故障时发生保护超越现象概率增大。

2) 不同电压跌落系数下，光伏场站处于不同运行方式时，相间工频变化量距离保护可靠性有所不同。其中当光伏场站处于“有功置零”运行状态时，可靠性最高，其余情况下相间继电器的可靠性降低；且光伏电站接入容量越大，低压穿越期间相间继电器

的可靠性越低，保护越可能出现误判。

3) 在交流送出线路系统中，当光伏系统接入容量小于容量边界时，距离保护能可靠动作，其可以作为快速定量评估保护适用性的可靠指标。反之，应该考虑低压穿越策略影响因素的存在，选择降低灵敏度为代价的保守整定或改用其他保护元件。

4) 仿真验证了上述结论的正确性，可为柔性直流系统交流侧、直驱风机、储能电站的送出线路距离保护的适应性机理以及优化配置提供理论支撑。

附录 A

1) 光伏场站并网系统拓扑结构

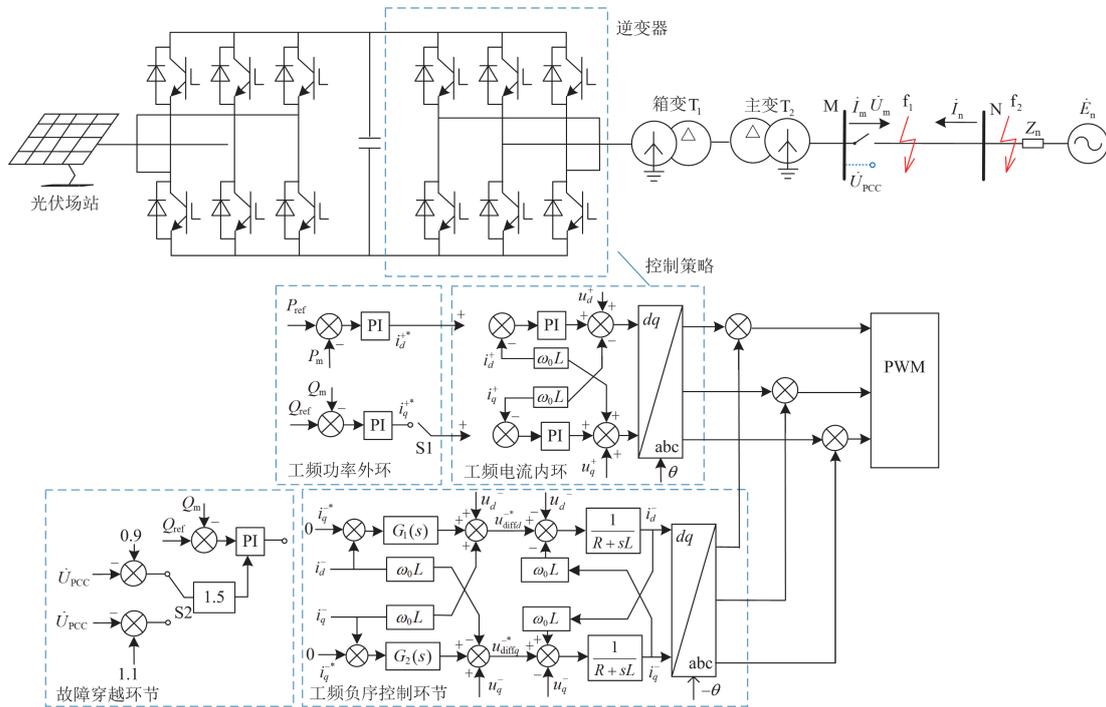


图 A1 光伏场站并网系统拓扑结构

Fig. A1 Topology structure of grid-connected photovoltaic power station system

2) 光伏场站相关参数

单个发电单元额定容量为 0.3 MW，额定电压/频率为 0.38 kV/50 Hz，本文中光伏场站容量可变，其送出容量由发电单元台数决定。

3) 变压器基本参数

箱变 T₁ 基本参数如表 A1 所示。

表 A1 箱变基本参数

Table A1 Transformer basic parameters

箱变 T ₁ 基本参数	数值
额定容量	1 MVA
接法及组号	Dyn11
短路阻抗	10%
变比	0.38 kV/35 kV

主变 T₂ 基本参数如表 A2 所示。

表 A2 主变基本参数

Table A2 Basic parameters of the main transformer

主变 T ₂ 基本参数	数值
额定容量	200 MVA
接法及组号	YNd11
短路阻抗	10%
变比	35 kV/220 kV

4) 线路参数

线路基本参数如表 A3 所示。

5) 传统工频变化量距离保护动作特性

表 A3 线路基本参数

Table A3 Basic parameters of the route

线路基本参数	数值
长度/km	40
正序电阻/(Ω/km)	0.0489
正序感抗/(Ω/km)	0.1322
零序电阻/(Ω/km)	0.2059
零序感抗/(Ω/km)	0.1099

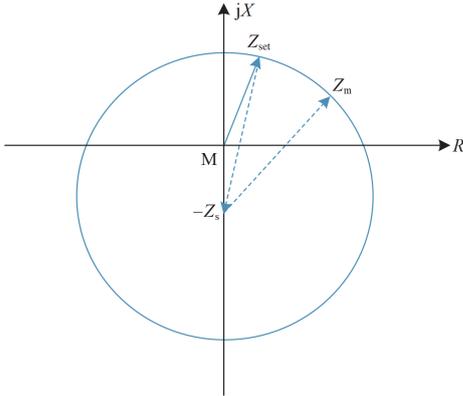


图 A2 正向故障相间阻抗继电器动作特性

Fig. A2 Characteristics of forward fault phase-to-phase impedance relay operation

附录 B

附录 B 为单相金属性故障下工频突变量距离保护适用性分析及仿真测试。

在单相金属性故障时, 其故障后补偿电压可以表示为

$$\dot{U}'_{op} = (\dot{I}'_{m1} + (3K_0 + 1)\dot{I}'_{m0})(Z_m - Z_{set}) \quad (B1)$$

式中: \dot{U}'_{op} 为单相距离继电器的故障后补偿电压; \dot{U}'_m 、 \dot{I}'_m 分别为 M 侧保护安装处的测量相电压、相电流, 下标 1、0 表示正序、零序分量; K_0 为零序补偿系数, $K_0 = (Z_0 - Z_1)/3Z_1$; \dot{I}'_{m0} 为零序电流。

发生单相接地故障序网如图 B1 所示。

图中下标 0、1、2 分别表示零序、正序、负序分量, 基于图 B1, \dot{U}'_{f1} 可以表示为

$$\begin{cases} \dot{U}'_{f1} \approx \frac{\dot{E}'_n Z_\Sigma}{Z_{n1} + Z_{f1} + Z_\Sigma} \\ Z_\Sigma \approx (Z_{f12} + Z_{n2} + Z_{n0} + 3R_f) \parallel (-\dot{U}'_{m1} / \dot{I}'_{m1} + Z_{f1}) \end{cases} \quad (B2)$$

当过渡电阻 R_f 很大但小于 $\dot{U}'_{m1} / \dot{I}'_{m1}$ 的实部时, $R_f \parallel (-\dot{U}'_{m1} / \dot{I}'_{m1} + Z_{f1})$ 往往幅值很大且位于第一象限, 基于式(B2)可知 $\arg \dot{U}'_{f1}$ 小于 0° , 此时 M 侧电气量如图 B2(a)所示; 当 $R_f = 0$ 时, 由于系统存在零序

支路, \dot{U}'_{f1} 无法严重跌落, 所以 $\arg Z_\Sigma$ 接近 90° , $\arg \dot{U}'_{f1}$ 接近 0° , 此时 M 侧电气量如图 B2(b)所示; 而当 $Z_{f12} + Z_{n2} + Z_{n0}$ 和 R_f 幅值相近时, 故障后的 \dot{U}'_{f1} 滞后于故障前。此时 M 侧电气量如图 B2(c)所示。

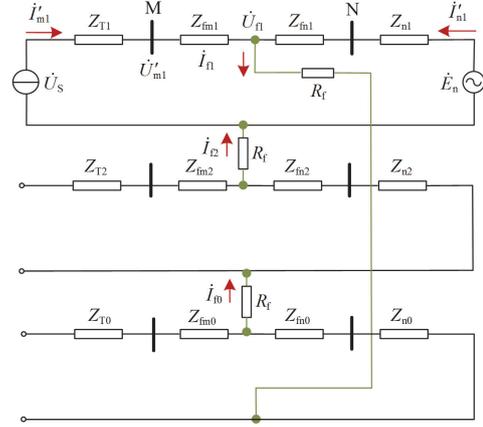


图 B1 区内单相接地故障序网图

Fig. B1 One-phase ground fault sequence network diagram within the region

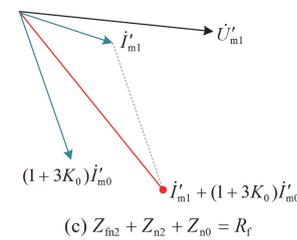
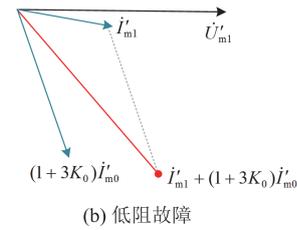
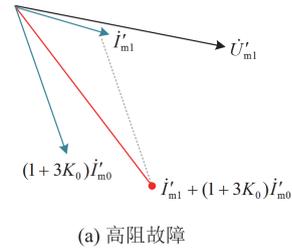


图 B2 单相接地故障电气向量图

Fig. B2 One-phase ground fault electrical vector chart

图 B2 中, 由于发生单相短路故障时, 并网点电压不会严重跌落, \dot{I}'_{m1} 角度开摆不大。再者, \dot{I}'_{m0}

的故障特性与其控制策略无关,与传统电网中单相短路故障时的特性相同,零序电流和故障前电压开摆角度近似为阻抗角。在该条件下, $I'_{m1} + (3K_0 + 1)I'_{m0}$ 一项如图中红色向量所示,由于零序电流的箝位作用,电流初相角增大,所以故障后补偿电压相位偏移较小,工频距离保护适应性有所改善。其适应性与零序电流大小有关:零序电流越大,工频距离保护适应性越强。图 B3 的测试结果与理论分析一致,在 A 相接地区内故障下,工频变化量距离保护仍然适用。

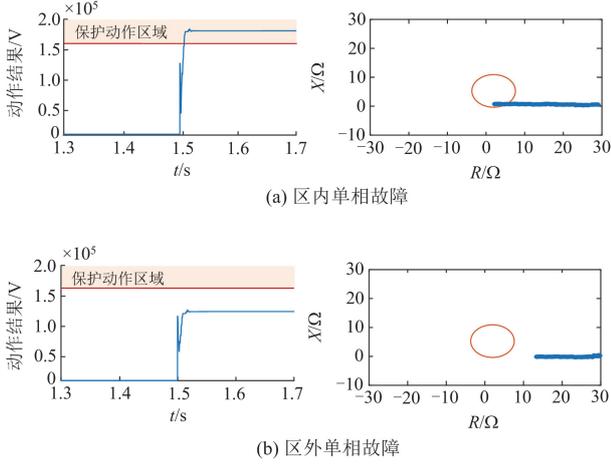


图 B3 保护动作情况(左为工频突变量;右为方向圆)

Fig. B3 Protection action status (the left is power frequency mutation amount; the right is direction circle)

附录 C

根据式(11)可得

$$\begin{cases} I'_m = N \frac{2S_N}{3U_N} \angle \varphi_i = N \frac{2S_N}{3U_N} (\cos \varphi_i + j \sin \varphi_i) \\ \varphi_i = \arctan \frac{1}{\sqrt{[NS_N / (1.5\gamma(0.9 - \gamma))]^2 - 1}} \end{cases} \quad (C1)$$

由式(D1)可知, α 的取值对 S_{N-max} 的影响程度与 γ 和 α 的大小有关。式(8)对 γ 求偏导,偏导数在 $\gamma \in [0.2, 0.9]$ 区间内恒小于 0,可见在区间内 $dS_{N-max} / d\alpha$ 单调递减,所以 $dS_{N-max} / d\alpha$ 在区间 $\gamma \in [0.2, 0.9]$ 内取值存在两种极端情况: $\gamma = 0.2$; $\gamma = 0.9$ 。

针对 $\cos \varphi_i$ 对 S_N 求偏导数,并记为 $d(\cos \varphi_i) / dS_N$,可得

$$\frac{d(\cos \varphi_i)}{dS_N} = \frac{-\left(3.84 \times S_N \times \left(\frac{1.92 \times S_N^2}{\gamma^2 \times (\gamma - 0.9)^2 - 1}\right)\right)}{\gamma^2 \times (\gamma - 0.9)^2 \times \left(\left(\frac{1.92 \times S_N^2}{\gamma^2 \times (\gamma - 0.9)^2 - 1}\right)^2 + 1\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (C2)$$

由式(C2)可知, S_N 取值对 $\cos \varphi_i$ 的影响程度与 γ 和 S_N 的大小有关。对于式(C2)对 γ 求偏导,偏导数在 $\gamma \in [0.2, 0.9]$ 区间内恒小于 0,可得在区间内 $d(\cos \varphi_i) / dS_N$ 单调递减,所以 $d(\cos \varphi_i) / dS_N$ 在区间 $\gamma \in [0.2, 0.9]$ 内取值存在两种极端情况: $\gamma = 0.2$; $\gamma = 0.9$ 。

经仿真可得 $\gamma = 0.2$ 和 $\gamma = 0.9$ 时 $d(\cos \varphi_i) / dS_N$ 的取值示意图如图 C1 所示。

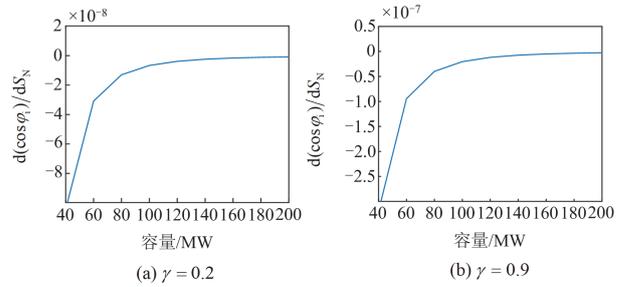


图 C1 $d(\cos \varphi_i) / dS_N$ 取值示意图

Fig. C1 $d(\cos \varphi_i) / dS_N$ value diagram

在这两种极端情况下, S_N 取值越大, $d(\cos \varphi_i) / dS_N$ 值越逼近于 0,所以可以认为 S_N 的偏导数的绝对值较小,甚至接近于 0,可见该变量的变化对函数值的影响较小,可忽略不计。

附录 D

针对 S_{N-max} 对 α 求偏导数,并记为 $dS_{N-max} / d\alpha$,可得

$$\begin{aligned} dS_{N-max} / d\alpha = & -17889 \{-Z_{set}^2 [U_N^2 (\gamma - 1)^2 - 36U_N^2 / 25] \times [89 / (50U_N^2) - 17889\alpha / (10000U_N) + 11\alpha^2 / (25U_N^2)]\}^{(1/2)} / \\ & \{2500U_N [17889\alpha / (5000U_N) - 89 / (25U_N^2)]^2\} - \{Z_{set}^2 [U_N^2 (\gamma - 1)^2 - 36U_N^2 / 25] \times [22\alpha / (25U_N^2) - \\ & 17889 / (10000U_N)]\} / \{[17889\alpha / (5000U_N) - 89 / (25U_N^2)] \times \{-Z_{set}^2 [U_N^2 (\gamma - 1)^2 - 36U_N^2 / 25] \times \\ & [89 / (50U_N^2) - 17889\alpha / (10000U_N) + 11\alpha^2 / (25U_N^2)]\}^{(1/2)}\} \end{aligned} \quad (D1)$$

经仿真可得 $\gamma = 0.2$ 和 $\gamma = 0.9$ 时 $dS_{N-max} / d\alpha$ 的取值示意图如图 D1 所示。

如图 D1 所示, $dS_{N-max} / d\alpha$ 取值恒小于 0,可见 S_{N-max} 函数在 α 区间内单调递减。若 α 取值较小,所得理论失效边界容量较大。如果选择此边界容量

作为光伏接入容量,若故障前光伏出力向上波动,即 α 取值变大(其理论失效边界容量较小),则会令接入容量超过理论失效边界容量,导致保护不正确动作的问题。所以 $S_{N-\max}$ 应取最小值,即 α 取1。

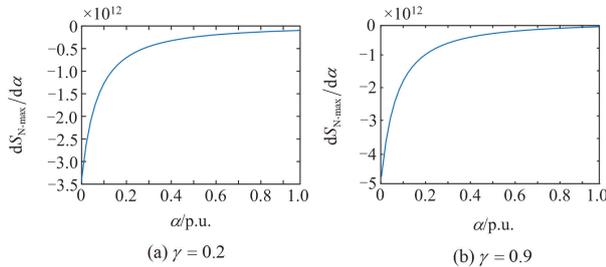


图 D1 $dS_{N-\max}/d\alpha$ 取值示意图

Fig. D1 $dS_{N-\max}/d\alpha$ value diagram

参考文献

- [1] 刘吉臻, 马利飞, 王庆华, 等. 海上风电支撑我国能源转型发展的思考[J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 149-159.
LIU Jizhen, MA Lifei, WANG Qinghua, et al. Offshore wind power supports China's energy transition[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 149-159.
- [2] 李斌, 周博昊, 何佳伟, 等. 直驱风电场送出线路的正序电压极化距离保护适用性分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 16-24.
LI Bin, ZHOU Bohao, HE Jiawei, et al. Applicability analysis of the distance protection scheme with the positive-sequence voltage polarization for the direct drive wind farm transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 16-24.
- [3] 于成澳, 高湛军, 刘朝, 等. 基于自适应制动补偿系数的有源配电网电流纵联差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 1-14.
YU Cheng'ao, GAO Zhanjun, LIU Zhao, et al. A current longitudinal differential protection method based on adaptive braking compensation coefficient for active distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 1-14.
- [4] 朱吉然, 牟龙华, 郭文明. 考虑并网运行微电网故障方向识别的逆变型分布式电源故障控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 634-644.
ZHU Jiran, MU Longhua, GUO Wenming. Fault control of inverter interfaced distributed generator considering fault direction identification of the grid-connected microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 634-644.
- [5] 陈福锋, 杨黎明, 宋国兵, 等. 主动探测式保护关键技术概述及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 175-186.
CHEN Fufeng, YANG Liming, SONG Guobing, et al. Overview and prospect of key technologies for active detection protection[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 175-186.
- [6] 戴志辉, 吴桐, 何静远, 等. 基于控保协同的有源配网主动注入式保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 94-103.
DAI Zhihui, WU Tong, HE Jingyuan, et al. An active distribution network active injection protection method based on control-protection coordination[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 94-103.
- [7] 邓靖雷, 姚良忠, 徐箭, 等. 一种基于附加谐波电流信号的主动配电网线路保护方法[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-17[2024-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20231012.1111.004.html>.
DENG Jinglei, YAO Liangzhong, XU Jian, et al. An additional harmonic current based line protection method of active distribution network[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-17[2024-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20231012.1111.004.html>.
- [8] 曾翔, 文明浩, 钱堃, 等. 逆变型分布式电源接入对接地距离保护的影响与对策[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 46-53.
ZENG Xiang, WEN Minghao, QIAN Kun, et al. Influence of inverter-interfaced distributed generation integration on grounding distance protection and its strategies[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 46-53.
- [9] HOOSHYAR A, AZZOUC M A, EL-SAADANY E F. Distance protection of lines emanating from full-scale converter-interfaced renewable energy power plants-part I: problem statement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1770-1780.
- [10] 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.
- [11] 王晨清, 宋国兵, 刘凯, 等. 突变量保护对风电接入系统的适应性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5485-5492.
WANG Chenqing, SONG Guobing, LIU Kai, et al. Adaptability analysis of fault component protection of power systems with wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5485-5492.

- [12] 张健康, 索南加乐, 何方明, 等. 交直流混联电网工频变化量距离保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 98-103.
ZHANG Jiankang, SUONAN Jiale, HE Fangming, et al. Performance analysis of distance protection based on industrial frequency variation applied to AC-DC hybrid power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 98-103.
- [13] 蔡东晓, 李海锋, 祝新驰, 等. 送出直流对工频变化量元件的影响机理分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 1-9.
CAI Dongxiao, LI Haifeng, ZHU Xinchu, et al. Mechanism analysis of the impact of DC system on power-frequency variation protections[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 1-9.
- [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): 3271-3280.
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): 3271-3280.
- [15] 叶远波, 王吉文, 汪胜和, 等. 计及故障点两侧零序电流相位差的新能源送出线路接地故障时域距离保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 180-187.
YE Yuanbo, WANG Jiwen, WANG Shenghe, et al. Time domain distance protection of new energy transmission line grounding fault considering the phase difference of zero sequence current on both sides of the fault point[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 180-187.
- [16] 国家能源局. 光伏并网逆变器技术规范: NB/T 32004—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [17] 韩海娟, 牟龙华, 张凡, 等. 考虑 IIDG 低电压穿越时的微电网保护[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 110-120.
HAN Haijuan, MOU Longhua, ZHANG Fan, et al. Microgrid protection considering low voltage ride-through of IIDG[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 110-120.
- [18] 戴志辉, 何静远, 王文卓, 等. 适用于逆变型分布式电源 T 接的配电网线路纵联保护方案[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(5): 88-94, 119.
DAI Zhihui, HE Jingyuan, WANG Wenzhuo, et al. Line pilot protection scheme for distribution network with inverter-interfaced distributed generation in T-connection mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(5): 88-94, 119.
- [19] 刘素梅, 王丹枫, 李伟, 等. 适应电流差动保护的光伏电站边界接入容量分析[J]. 可再生能源, 2023, 41(5): 644-652.
LIU Sumei, WANG Danfeng, LI Wei, et al. The boundary capacity of photovoltaic power plant adapted to current differential protection[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(5): 644-652.
- [20] 王宁, 韩国栋, 高厚磊, 等. 有源配电网电流差动保护判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 14-23.
WANG Ning, HAN Guodong, GAO Houlei, et al. The current differential protection criterion of active distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 14-23.
- [21] 索南加乐, 何方明, 焦在滨, 等. 工频变化量距离元件特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 59-65.
SUONAN Jiale, HE Fangming, JIAO Zaibin, et al. Research on the characteristics of distance element based on the power-frequency voltage and current variation[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 59-65.
- [22] 李一泉, 屠卿瑞, 陈桥平, 等. 大型光伏电站对送出线路保护选相元件的影响[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2976-2982.
LI Yiquan, TU Qingrui, CHEN Qiaoping, et al. Influence of large-scale photovoltaic power plant on phase-selection elements of line protections[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2976-2982.
- [23] 李红, 粟时平, 唐铭泽, 等. 不对称故障下考虑电压跌落程度的新能源逆变器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 21-32.
LI Hong, SU Shiping, TANG Mingze, et al. Control strategy of renewable energy inverter considering voltage sag degree under asymmetric faults[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 21-32.

收稿日期: 2024-03-29; 修回日期: 2024-07-03

作者简介:

戴志辉(1980—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: daihuadian@163.com

韦舒清(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: weishuqing424@163.com

(编辑 魏小丽)