

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181351

一种适用于光伏场站送出线的自适应距离保护改进方案

王峰渊¹, 方愉冬¹, 赵萍², 郑远德², 周再兵², 郑涛³, 王铭灏³, 黄予园³

(1. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007; 2. 国网浙江省电力有限公司台州供电公司, 浙江 台州 318000; 3. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 由于光伏场站的弱馈性, 当送出线路发生经过渡电阻短路时, 传统距离保护可能无法正确动作。而自适应距离保护方案在一定程度上解决了区内故障保护拒动的问题, 但存在区外故障误动的可能。首先分析了区外故障时自适应距离保护误动的原因, 进而提出了一种自适应距离保护的改进方案。在现有自适应距离保护的動作特性基础上, 引入线路的短路阻抗, 根据区内、外故障下线路短路阻抗的大小差异, 构成保护的辅助判据, 以甄别可能引起现有自适应距离保护误判的区外故障。该方法仅依靠光伏侧电气量近似求取线路短路阻抗值, 与现有自适应距离保护相互配合实现区内、外故障正确判别。最后通过 PSCAD 仿真验证了改进方案的有效性。

关键词: 光伏场站; 弱馈性; 自适应距离保护; 短路阻抗; 辅助判据

An improved adaptive distance protection scheme for the outgoing line of PV power station

WANG Fengyuan¹, FANG Yudong¹, ZHAO Ping², ZHENG Yuande², ZHOU Zaibing², ZHENG Tao³,
WANG Minghao³, HUANG Yuyuan³

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China; 2. Taizhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Taizhou 318000, China; 3. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: When non-metallic faults occur on the outgoing line of the photovoltaic (PV) power station, the performance of traditional distance protection may be deteriorated due to the weak-infeed property of the PV power station. The existing adaptive distance protection scheme can improve the performance of the distance protection to some extent, but there is the possibility of mal-operation when the external fault occurs. Firstly, the reasons for mal-operation of adaptive distance protection are analyzed when the external fault occurs, and then an improved scheme for adaptive distance protection is proposed. Due to the defects of adaptive distance protection, the short-circuit impedance of the line is introduced. According to the difference of the short-circuit impedance under internal fault and external fault, the auxiliary criterion is formed to identify external faults which may result in the mal-operation of the existing adaptive distance protection. The new scheme only needs the PV side electric quantities to obtain the short-circuit impedance approximately, and cooperates with the existing adaptive distance protection to distinguish internal and external faults. Finally, the simulation based on the PSCAD verifies the proposed scheme.

This work is supported by National Key Research and Development Program Smart Grid Technology and Equipment Key Project (No. 2016YFB0900600).

Key words: PV power station; weak-infeed property; adaptive distance protection; short-circuit impedance; auxiliary criterion

0 引言

近些年来, 以光伏为代表的新能源发电成为电

力行业重要的发展领域, 光伏装机容量剧增。然而大容量光伏接入电网会对传统的继电保护产生影响^[1-5], 其中光伏电站明显的弱馈特性更严重影响了传统距离保护的可靠动作^[6-8]。受新能源场站弱馈性的影响, 传统距离保护抗过渡电阻能力较差, 对此已有不少学者提出了自适应距离保护方案^[9-11], 改

基金项目: 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项资助 (2016YFB0900600)

善了保护的動作特性,其中文献[9]以由风电场送出线路为例,分析了影响距离保护的各个因素,提出了基于这些影响因素的自适应距离保护方案,但对保护的動作特性的分析并不完整,没有研究区外故障保护的動作情况。文献[10]采用对称分量法求取测量阻抗,并依据影响测量阻抗的参数提出了基于风机的 T 接线路的纵联自适应距离保护方案,对区内故障有较强的判别能力,但同样没有分析保护方案对区外故障的识别能力。文献[11]分析了光伏出线距离保护的适应性,提出了基于求取附加阻抗角的自适应方案,由于采用了线路两侧的电气量,对通信要求较高。

本文主要分析了送出线路光伏侧自适应距离保护的适应性:现有自适应距离保护一定程度上解决了区内故障距离保护拒动的问题,而区外故障仍存在误动作的可能。本文提出了一种自适应距离保护改进方案,在现有自适应距离保护的曲边四边形动作区域的基础上,引入线路短路阻抗(故障点到保护安装处的线路阻抗)的概念,根据区内外故障短路阻抗值的明显差异,构成自适应距离保护的辅助判据。此方案通过光伏侧单端电气量近似求取线路短路阻抗值,并与现有自适应距离保护相互配合判别区内外故障,有效降低了现有自适应距离保护区外故障误动的风险,弥补了现有自适应距离保护的不足,改善了其动作性能。

1 光伏场站侧距离保护适应性分析

1.1 传统距离保护

如图 1 所示, N 侧电源为普通的系统电源, M 侧电源为光伏场站。当线路 MN 上某一点发生经过渡电阻 R_g 接地故障,以 A 相单相接地短路为例,则 M 侧的测量阻抗可以表示为^[12-13]

$$Z_M = \frac{\dot{U}_{MA}}{\dot{I}_{MA} + K \times 3\dot{I}_{M0}} = Z_d + \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_{MA} + K \times 3\dot{I}_{M0}} R_g = Z_d + h e^{j\varphi} R_g \quad (1)$$

式中: \dot{U}_{MA} 和 \dot{I}_{MA} 分别为保护安装处 A 相的测量电压和电流; \dot{I}_{M0} 为保护安装处 A 相零序电流; K 为零序电流补偿系数, $K = (z_0 - z_1)/(3z_1)$, z_0 和 z_1 分别为线路单位长度零序阻抗和正序阻抗; \dot{I}_f 是故障点电流; Z_d 为光伏侧母线到故障点的正序阻抗值,称为短路阻抗; $h e^{j\varphi} R_g$ 为过渡电阻引起的附加阻抗; h 与 φ 分别表示相量 $\dot{I}_f/(\dot{I}_{MA} + K \times 3\dot{I}_{M0})$ 的幅值与相角。

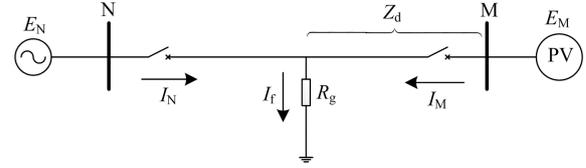


图 1 双端系统单相接地短路示意图

Fig. 1 Single-phase-to-ground fault in double end system

光伏电源与传统的电源不同,由于光伏逆变器的限流措施和光伏容量的限制,线路短路后光伏侧能够提供的短路电流通常不会大于 1.2~1.5 倍额定电流^[14-15],表现出明显弱电源特性,而 N 侧系统却能提供十几倍至几十倍额定电流的短路电流。因此在式(1)中,由于 h 的影响,即使实际过渡电阻比较小,但光伏侧附加阻抗值较大,距离保护可能无法正确动作。

1.2 现有自适应距离保护原理

为解决新能源场站接入线路距离保护受弱馈性严重影响而无法正确动作的问题,有文献提出了自适应距离保护方案^[9-10]:通过改变新能源场站侧等效正序阻抗、联络线两侧电源电势相位差、电势比等影响因素,来调整由曲边四边形构成的动作区域,实现对新能源场站不同运行方式的自适应。以单相接地短路为例,结合图 1 所示,若 MN 两侧系统均为普通电源,当线路上一点发生 A 相经过渡电阻短路时, M 侧系统保护安装处的测量阻抗表达式为^[9]

$$Z_M = Z_{Mf1} + \Delta Z = nZ_{MN} + \frac{3R_g}{D_d(Z_\Sigma + 3R_g) + C_{M1} + C_{M2} + (1+3K)C_{M0}} \quad (2)$$

式中: n 是故障位置系数,其值为保护安装处到故障点距离占线路总长度的百分比; ΔZ 为附加测量阻抗; Z_{MN} 为线路总阻抗; Z_Σ 为各序阻抗之和; D_d 定义为综合系数,其表达式为

$$D_d = \frac{(1 - \rho e^{-j\delta})}{Z_{SN1} + (1-n)Z_{MN} + \rho e^{-j\delta}(Z_{SM1} + nZ_{MN})} \quad (3)$$

式中: Z_{SM1} 和 Z_{SN1} 分别代表 M 侧和 N 侧系统等效的正序阻抗; ρ 代表故障前两端电源电动势幅值之比; δ 代表故障前两端电源电动势相位差,可具体表示为

$$\frac{\dot{E}_N}{\dot{E}_M} = \rho e^{-j\delta} \quad (4)$$

此外,式(2)中 C_{M1} 、 C_{M2} 和 C_{M0} 分别为正序、负序电流分配系数和零序电流分配系数,表示保护安装处各序故障电流与故障点相应各序电流之比,并有式(5)成立。

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{M1} = C_{M1} \dot{I}_{f1} \\ \dot{I}_{M2} = C_{M2} \dot{I}_{f2} \\ \dot{I}_{M0} = C_{M0} \dot{I}_{f0} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta \dot{I}_{M1}$ 为保护安装处 A 相正序电流的故障分量; \dot{I}_{M2} 、 \dot{I}_{M0} 分别为保护安装处负序和零序电流; \dot{I}_{f1} 、 \dot{I}_{f2} 和 \dot{I}_{f0} 分别为故障点正、负和零序电流。

若 M 侧系统为光伏场站, 由于光伏场站一般采取抑制负序电流控制策略, 因而故障后光伏侧可以等效为没有负序电流输出, 即 $C_{M2}=0$ 。将 $C_{M2}=0$ 代入式(2)中, 得光伏侧保护安装处的测量阻抗为

$$Z_M = Z_{Mf1} + \Delta Z = nZ_{MN} + \frac{3R_g}{D_d(Z_\Sigma + 3R_g) + C_{M1} + (1+3K)C_{M0}} \quad (6)$$

通过式(6)可以发现, 附加阻抗的大小与 n 、 R_g 、 P 、 δ 和 Z_{SM1} 等参数的大小相关。其中 P 、 δ 和 Z_{SM1} 的大小可通过系统运行方式确定。此外根据实际工程需要, 预先确定被保护线路范围与可耐受过渡电阻值, 便可确定 n 和 R_g 的范围, 构成曲边四边形的动作区域, 如图 2 所示, 动作区域由曲线 I—IV 围成, 四条曲线的含义分别为

曲线 I: $n=0$, R_g 的取值范围为 0 到 R_{gmax} ;

曲线 II: $n=n_{max}$, R_g 的取值范围为 0 到 R_{gmax} ;

曲线 III: $R_g=0$, n 的取值范围为 0 到 n_{max} ;

曲线 IV: $R_g=R_{gmax}$, n 的取值范围为 0 到 n_{max} 。

其中, R_{gmax} 为当前阻抗继电器所能耐受的最大过渡电阻值, n_{max} 是线路最大被保护长度与本线路总长度比值, 通常 n_{max} 取 1, 表示保护本线路全长。

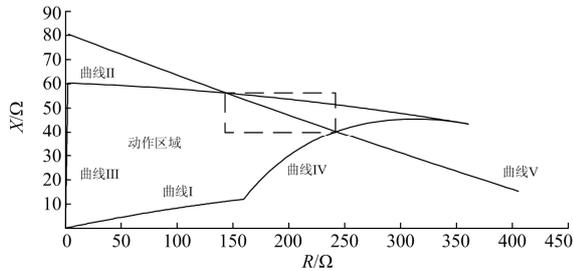


图 2 自适应距离保护动作区域

Fig. 2 Operating zone of adaptive distance protection

1.3 现有自适应距离保护存在的问题

对于光伏出线侧距离保护来讲, 现有自适应距离保护有效解决了区内故障时传统距离保护拒动的问题。而目前的相关研究仅讨论了区内故障保护的动作特性^[16-19], 而对于区外发生故障时保护的动作性能, 还没有相关的论述。

由 1.2 节自适应距离保护的動作区域构成原则可以看出, 保护动作区域边界均根据测量阻抗的表达式(6)求得, 因此自适应保护的動作区域其实是不同故障点不同过渡电阻条件下, 所有测量阻抗的集合, 区内故障的测量阻抗定会落在自适应距离保护的動作区域内。以单相接地故障为例, 由式(6)可知, 区外经小电阻单相接地故障时和区内经大电阻单相接地时, 理论上两种条件下测量阻抗可能相等, 这两种情况的测量阻抗都会落在保护区内, 因此现有自适应距离保护需要进一步明确区分保护区内抑或区外故障。

基于 PSCAD 仿真平台, 构建如图 1 所示的光伏送出线路仿真模型, 以保护线路全长为例, 考察区外单相接地故障, 自适应距离保护动作情况。当区外某一点经不同的过渡电阻接地时, 测量阻抗轨迹可能如图 2 中曲线 V 所示, 其中部分测量阻抗值(如虚线框所示)落入保护的動作区域内, 可能导致误动的发生。

综上, 光伏场站送出线发生单相接地故障时, 传统距离保护和现有自适应距离保护均存在一定的问题, 亟需一种改进距离保护方案, 保障光伏场站送出线的安全运行。

2 改进的自适应距离保护原理

针对 1.3 节分析的现有自适应距离保护存在的问题, 提出改进自适应距离保护方案: 通过引入线路短路阻抗(故障点到保护安装处的线路阻抗)的概念, 根据区内外故障下线路短路阻抗的大小差异, 构成自适应距离保护的辅助判据, 与现有自适应距离保护相互配合对区外故障加以区分。

2.1 线路短路阻抗的求取

由 1.1 节的分析可知, 测量阻抗(Z_M)是由线路短路阻抗(Z_d)和附加阻抗(ΔZ)两部分组成, 如图 3 所示, 其中 φ 和 α 分别代表了线路阻抗角和附加阻抗角。其中, 当 $\alpha < 0^\circ$ 时, 附加阻抗为阻容性, 当 $\alpha > 0^\circ$ 时, 附加阻抗为阻感性^[20-21]。

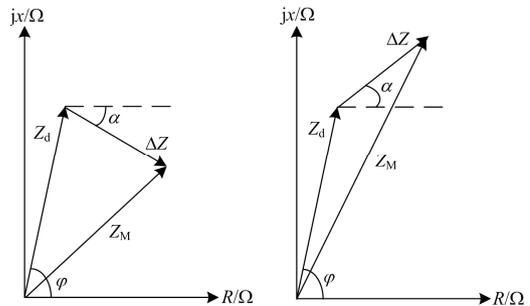


图 3 阻抗复数平面

Fig. 3 Impedance complex plane

由 1.3 节分析可知, 现有自适应距离保护方案无法正确区分区内外故障的原因是区内和区外故障均可能测得相同测量阻抗。结合图 3 给出的各阻抗之间的几何关系知, 在测量阻抗值相等条件下, 区内故障和区外故障的测量阻抗、短路阻抗和附加阻抗在复平面上的几何关系如图 4 所示, 图中 α_1 和 α_2 分别代表区内外故障的附加阻抗角。 Z_{dSET} 、 Z_{d1} 和 Z_{d2} 分别代表被保护线路的短路阻抗整定值、区内故障短路阻抗和区外故障短路阻抗; ΔZ_1 和 ΔZ_2 分别代表区内故障附加阻抗和区外故障附加阻抗; Z_M 代表故障后测量阻抗。若区内外故障的附加阻抗皆为

阻容性($\alpha_1 < 0^\circ, \alpha_2 < 0^\circ$), 则两者的阻抗几何关系如图 4(a) 所示; 若区内故障的附加阻抗为阻感性($\alpha_1 > 0^\circ$), 区外故障的附加阻抗为阻容性($\alpha_2 < 0^\circ$), 如图 4(b) 所示; 若区内外故障的附加阻抗皆为阻感性($\alpha_1 > 0^\circ, \alpha_2 > 0^\circ$), 如图 4(c) 所示。

从图 4 可以看出, 无论是哪一种情况, 区外故障点的短路阻抗始终大于区内故障点的短路阻抗, 因此可通过判断短路阻抗大小来构建辅助判据, 进而判别故障点位置。

根据图 3 复平面的几何关系, 可得到如下方程组:

$$\begin{cases} X_d - X_m = \tan\alpha(R_d - R_m) \\ R_d = X_d / \tan\varphi \end{cases} \quad (7)$$

式中: R_m 和 X_m 分别为测量阻抗的实部和虚部; R_d 和 X_d 分别为短路阻抗的实部和虚部; α 为附加阻抗角; φ 为线路阻抗角。

由式(7)解方程组, 得

$$\begin{cases} R_d = \frac{X_m - R_m \tan\alpha}{\tan\varphi - \tan\alpha} \\ X_d = \frac{X_m - R_m \tan\alpha}{1 - \tan\alpha \cot\varphi} \end{cases} \quad (8)$$

将式(7)和式(8)代入短路阻抗幅值表达式 $|Z_d| = \sqrt{R_d^2 + X_d^2}$, 可得:

$$\begin{aligned} |Z_d| &= \sqrt{1 + \cot^2\varphi} |X_d| = \\ &= \sqrt{1 + \cot^2\varphi} \left| \frac{X_m - R_m \tan\alpha}{1 - \tan\alpha \cot\varphi} \right| \end{aligned} \quad (9)$$

在实际工程中 $X_d \geq 0$ 恒成立, 同时 $0 < \varphi < 90^\circ$, 所以式(9)可以写成:

$$|Z_d| = \sqrt{1 + \cot^2\varphi} \frac{X_m - R_m \tan\alpha}{1 - \tan\alpha \cot\varphi} = \frac{X_m - R_m \tan\alpha}{\sin\varphi(1 - \tan\alpha \cot\varphi)} \quad (10)$$

由式(10)可以看出, φ 、 R_m 、 X_m 和 α 是影响 $|Z_d|$ 大小的主要参数。其中线路阻抗角 φ 可在实际工程得到, R_m 和 X_m 的大小可在故障之后测得, 只需得到附加阻抗角 α 的大小, 就可以求出短路阻抗幅值 $|Z_d|$ 。

2.2 附加阻抗角的近似求取方法

结合式(1)以及 1.2 节的分析, 在单相接地条件下, 附加阻抗角 α 的表达式为

$$\alpha = \arg(\Delta Z) = \arg\left(\frac{3R_g \dot{I}_{f0}}{\dot{I}_{MA} + K \times 3\dot{I}_{M0}}\right) \quad (11)$$

将 $\dot{I}_{M0} = C_{M0} \dot{I}_{f0}$ 代入式(11)得

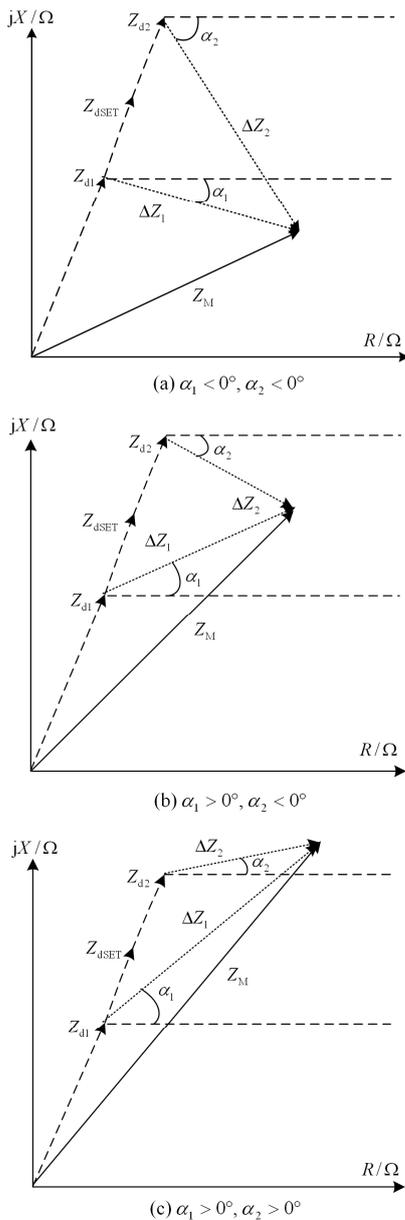


图 4 相同测量阻抗的三种可能情况

Fig. 4 Three possible cases of the same measured impedance

$$\alpha = \arg\left(\frac{3R_g \dot{i}_{M0}}{C_{M0}(\dot{i}_{MA} + K \times 3\dot{i}_{M0})}\right) \quad (12)$$

式(12)中, 过渡电阻 R_g 认为是实数, 在高压系统中, 一般可将零序电流分配系数 C_{M0} 近似当作实数处理^[22], 则附加阻抗角 α 的表达式为

$$\alpha = \arg\left(\frac{\dot{i}_{M0}}{\dot{i}_{MA} + K \times 3\dot{i}_{M0}}\right) \quad (13)$$

通过此表达式可知, 不需要对端信息, 仅利用光伏侧的测量值 \dot{i}_{MA} 和 \dot{i}_{M0} 就可近似求得附加阻抗角 α 。

2.3 改进的自适应距离保护判据

现有自适应距离保护的曲边四边形动作区域(图2)具体构成方法如1.2节所示。在现有自适应距离保护的曲边四边形动作特性的基础上, 近似计算线路短路阻抗 $|Z_d|$, 进一步判别故障位置, 当 $|Z_d|$ 大于保护线路阻抗整定值 $|Z_{SET}|$ 时, 判定为区外故障。 $|Z_{SET}|$ 的整定公式为

$$|Z_{SET}| = L \cdot |Z_1| \quad (14)$$

式中: L 为被保护线路长度; Z_1 单位长度线路阻抗。只有当测量阻抗 Z_M 落入自适应距离保护的曲边四边形动作区域中, 同时满足短路阻抗幅值 $|Z_d| < |Z_{SET}|$, 判定故障点位于保护范围内, 自适应距离保护动作。通过判断线路短路阻抗的大小, 提高了现有自适应距离保护的区内外故障识别能力, 有效减小了保护误动的可能。

3 改进自适应距离保护方案验证

基于 PSCAD 仿真平台搭建图5所示的系统仿真模型。系统的电压等级为 110 kV, N 侧系统的参数为: $Z_{SN1}=8+j159.65 \Omega$, $Z_{SN0}=2+j37.47 \Omega/\text{km}$ 。线路 L1 和线路 L2 长度分别为 80 km 和 50 km, 线路参数均为 $Z_1=0.105+j1.258 \Omega/\text{km}$, $Z_0=0.315+j3.774 \Omega/\text{km}$ 。M 侧系统为光伏场站, 额定容量为 3 MW。以光伏场站送出线保护 1 为研究对象, 其保护范围设定为 L1 线路全长。K1 为区内故障点, K2 和 K3 为区外故障点。

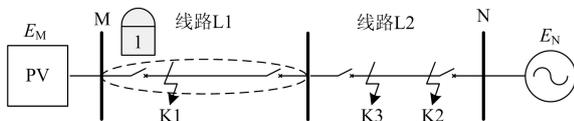


图5 仿真系统

Fig. 5 Simulation system

传统距离保护 I 和 II 段采用方向圆特性, III 段采用偏移阻抗圆特性, 偏移率取 5%。I 段只反映本线路故障, 一般为保护本线路的 80%, 由式(14)可

求得 $|Z_{SET}^I| = 80.79$, I 段瞬时动作; 本算例中, II 段与相邻线路 II 段配合才能保证本线路末端故障有足够的灵敏度, 由 II 段整定公式^[23]得 $|Z_{SET}^{II}| = 131.29$, II 段延时 0.5 s 动作。III 段要躲过正常运行时最小负荷阻抗整定, 对远/近后备都要有一定灵敏度, 根据 III 段整定公式^[23]得 $|Z_{SET1}^{III}| = 196.93$ 。反向动作区整定阻抗 $|Z_{SET2}^{III}| = 9.85$ 。III 段动作时间应不小于振荡周期, 取 2 s。

改进自适应距离保护的保护区可根据实际情况确定, 本文以保护本线路 L1 全长为例, 根据线路短路阻抗整定值的整定原则知其整定值应为 L1 的线路阻抗值, 由式(14)可求得 $|Z_{SET}| = 101$ 。最大耐受过渡电阻值可根据工程实际情况确定, 本文设最大耐受过渡电阻 $R_{gmax}=100 \Omega$ 。

1) 区内故障仿真验证

设故障位置 $n=0.5(K1)$, 过渡电阻为 80Ω , 线路 L1 发生 A 相单相接地故障。分析对比改进自适应距离保护与传统距离保护的動作特性。故障位置位于 I 段保护范围内, 仿真结果如图 6 所示, $Z_M = 123.06+j33.03 \Omega$, 测量阻抗值落在了传统距离保护三段动作区域外, 传统距离保护三段均不能正确动作; 同时测量阻抗落入改进自适应距离保护动作区域内, 而辅助判据 $|Z| = 51.53 < |Z_{SET}| = 101$, 因此改进自适应距离保护可以正确动作。

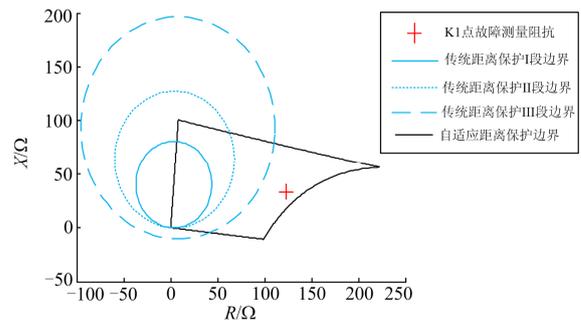


图6 区内故障(K1)仿真结果

Fig. 6 Simulation result when the internal fault (K1) occurs

仿真模拟本线路 L1 上不同位置($n=0.1$ 、 0.5 和 0.9)以及经过不同的过渡电阻($R_g=5 \Omega$ 、 50Ω 、 80Ω 和 100Ω)发生单相接地故障, 传统距离保护、现有自适应距离保护和改进自适应距离保护的仿真结果如表 1 所示(√表示保护元件动作, ×表示保护元件不动作, *表示保护元件误动, #表示保护元件拒动)。由表 1 可以看出: 本线路发生故障时, 大多数情况下, 传统距离保护的 I 段和 II 段都难以正确动作, 故障不能被快速切除, 尤其当过渡电阻值较大时, 传统距离保护的 III 段都无法正确动作; 而改进自适

应距离保护对区内故障的判别准确，具有良好的动作性能。

表 1 不同故障位置 and 不同过渡电阻条件下传统距离保护、现有自适应距离保护和改进自适应距离保护动作情况对比

Table 1 Comparison of action results of traditional distance protection, existing adaptive distance protection and new adaptive distance protection with different fault locations and different transition resistance

故障位置 n	过渡电阻 R_g/Ω	测量阻抗/ Ω	传统距离保护			现有自适应距离保护	辅助判据		改进自适应距离保护	
			I	II	III	动作情况	估算结果 $ Z_d $	动作情况 $ Z_{SET} =101$	动作情况	
本线路故障	0.1	5	$11.74 \angle 53.59^\circ$	✓	✓	✓	✓	10.17	✓	✓
	0.1	50	$59.095 \angle 3.53^\circ$	#	#	✓	✓	10.62	✓	✓
	0.1	80	$94.51 \angle -1.18^\circ$	#	#	#	✓	10.98	✓	✓
	0.1	100	$112.73 \angle -1.17^\circ$	#	#	#	✓	11.04	✓	✓
	0.5	5	$50.932 \angle 75.76^\circ$	✓	✓	✓	✓	50.79	✓	✓
	0.5	50	$89.88 \angle 25.93^\circ$	#	#	✓	✓	51.21	✓	✓
	0.5	80	$127.42 \angle 15.02^\circ$	#	#	#	✓	51.53	✓	✓
	0.5	100	$153.05 \angle 10.97^\circ$	#	#	#	✓	51.71	✓	✓
	0.9	5	$90.696 \angle 77.28^\circ$	×	✓	✓	✓	91.24	✓	✓
	0.9	50	$137.27 \angle 30.25^\circ$	×	#	#	✓	91.92	✓	✓
相邻线路故障	0.9	80	$186.84 \angle 17.90^\circ$	×	#	#	✓	92.04	✓	✓
	0.9	100	$220.97 \angle 13.16^\circ$	×	#	#	✓	92.27	✓	✓
	1.1	70	$202.13 \angle 21.54^\circ$	×	#	#	×	100.32	✓	×
	1.2	10	$121.21 \angle 67.16^\circ$	×	#	#	×	121.77	×	×
	1.2	70	$240.01 \angle 15.24^\circ$	×	#	#	×	122.37	×	×
	1.5	30	$220.07 \angle 15.12^\circ$	×	×	#	*	151.70	×	×
	1.5	70	$414.22 \angle -2.88^\circ$	×	×	#	×	150.11	×	×
	1.6	15	$168.56 \angle 16.47^\circ$	×	×	#	*	159.18	×	×
	1.6	70	$563.65 \angle -15.2^\circ$	×	×	#	×	152.17	×	×
	1.625	10	$137.39 \angle 25.92^\circ$	×	×	#	*	161.91	×	×

注：✓表示保护元件动作，×表示保护元件不动作，*表示保护元件误动，#表示保护元件拒动

2) 区外故障仿真验证

设故障位置 $n=1.6(K2)$ ，过渡电阻为 15Ω ，即在线路 L2 上发生了 A 相单相接地故障。仿真结果如图 7 所示， $Z_M=161.64+j47.81 \Omega$ ，由于故障位置位于相邻线路末端，应由相邻线路的自适应距离保护瞬时动作，然而测量阻抗落在了本线路自适应距离保护动作区域内，导致本线路现有自适应距离保护瞬时误动作。辅助判据 $|Z|=159.18 > |Z_{SET}|=101$ ，大于改进自适应距离保护整定值，因此即使测量阻抗落入保护的的动作区域内，改进自适应距离保护仍然不会动作。仿真验证了 1.3 节分析的保护适应性问题以及第 2.1 节构建辅助判据判别故障位置的正确性。

设故障位置为 $n=1.2(K3)$ ，过渡电阻为 10Ω ，即在线路 L2 上发生 A 相接地故障。仿真结果如图 7 所示， $Z_M=47.06 + j11.71 \Omega$ ，辅助判据 $|Z|=121.77 > |Z_{SET}|=101$ ，测量阻抗落在了自适应距离保护动作区之外，因此保护不会误动作，由相邻线路自适应距离保护瞬时动作切除故障。

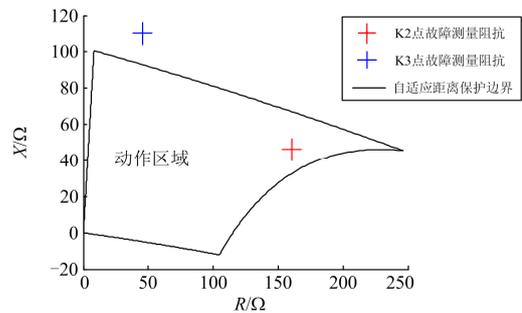


图 7 区外故障(K2,K3)仿真结果

Fig. 7 Simulation results when the external faults (K2,K3) occur

相邻线路 L2 发生经过渡电阻单相接地故障 ($n=1.05、1.2、1.5、1.6$ 以及 $R_g=10 \Omega、15 \Omega、30 \Omega、70 \Omega$)，现有自适应距离保护和改进自适应距离保护动作情况同样由表 1 给出。通过表 1 数据可知：在相邻线路末端发生经小电阻接地时，测量阻抗会进入现有自适应距离保护动作区域，造成保护误动作；而改进自适应距离保护对区外故障有良好的判别能力，能够可靠不动作。

通过上述仿真分析看出:故障位置位于自适应距离保护的保护范围内时,现有的自适应距离保护和改进自适应距离保护均能可靠动作;而对于区外故障,特别是经小电阻接地时,现有自适应距离保护可能误动,在增加了辅助判据之后,改进自适应距离保护能够有效地区分区内和区外故障。

4 结论

本文提出了一种适用于光伏场站送出线的改进自适应距离保护方案。改进方案能够有效地区分光伏送出线路的区内、区外故障,同时可根据实际工程要求,改变最大可耐受过渡电阻值,有较强的耐受过渡电阻能力。相关参数的求取仅需要用到送出线路的光伏侧电气量,不需要线路对侧系统的相关电气量,降低了对通信设备的要求,此外,改进方案可进一步借鉴阶段式保护思想,采用构成三段式配置方式。

本文仅以单相接地故障为例进行分析,分析方法同样适用于其他类型接地故障,具有良好的动作特性,限于篇幅,本文不再赘述。

参考文献

- [1] YAN Kai, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo. Analysis and improvement of relay protection for photovoltaic power station connected to power grid[C] // 2013 The Fourteenth National Symposium on Protection and Control, October 31-November 3, 2013, Zhengzhou, China: 1-7.
- [2] 张海玉, 刘闯, 晁勤, 等. 具有 LVRT 能力的并网光伏系统继电保护问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 53-60.
ZHANG Haiyu, LIU Chuang, CHAO Qin, et al. Research on relay protection issues of grid-connected photovoltaic system with LVRT ability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 53-60.
- [3] 高亮, 郎陈杰, 夏能弘. 分布式电源并网条件下配电网继电保护方案设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 143-149.
GAO Liang, LANG Chenjie, XIA Nenghong. Design of relay protection scheme of distribution network with DG[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 143-149.
- [4] WANG Longchang, GAO Houlei, ZOU Guibin. Modeling methodology and fault simulation of distribution networks integrated with inverter-based DG[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 370-378. DOI: 10.1186/s41601-017-0058-9.
- [5] 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.
- [6] 瞿继平, 吴兴全, 闫凯, 等. 光伏电站弱电源特性对送出线路继电保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 146-151.
QU Jiping, WU Xingquan, YAN Kai, et al. Influence of PV station weak power feature on relay protection of outgoing transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 146-151.
- [7] 翟学, 林涛, 吴俊鹏, 等. 含光伏电站的电网自适应接地距离保护研究[J]. 中国电力, 2016, 49(2): 78-83.
ZHAI Xue, LIN Tao, WU Junpeng, et al. Research on adaptive grounding distance protection of power grids with photovoltaic power stations[J]. Electric Power, 2016, 49(2): 78-83.
- [8] 郭金学, 南东亮, 郝红岩, 等. 光伏电站接入对距离保护和重合闸的影响[J]. 电气技术, 2017(11): 25-31, 38.
GUO Jinxue, NAN Dongliang, HAO Hongyan, et al. Effects of PV power station on distance protection and automatic reclosing[J]. Electrical Engineering, 2017(11): 25-31, 38.
- [9] 王婷, 李凤婷, 何世恩. 影响风电场联络线距离保护的要素及解决措施[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1420-1424.
WANG Ting, LI Fengting, HE Shi'en. Factors impacting distance protection for tie line of wind farm and corresponding countermeasures[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1420-1424.
- [10] 郑涛, 赵裕童, 陈璨, 等. 基于自适应阻抗继电器的风电 T 接线路纵联保护方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 81-90.
ZHENG Tao, ZHAO Yutong, CHEN Can, et al. Pilot protection scheme for power transmission line with type wind power connection based on adaptive impedance relay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 81-90.
- [11] 孙苗苗, 王慧, 朱晓荣. 一种光伏电站送出线路自适应距离保护方法[J]. 电测与仪表, 2017, 54(20): 50-55, 115.
SUN Miaomiao, WANG Hui, ZHU Xiaorong. Research on a method of adaptive distance protection for transmission line of photovoltaic power station[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2017, 54(20): 50-55, 115.
- [12] 冯爱成, 王宝华, 单馨. 含光伏电源配电网的自适应距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 141-147.

- FENG Aicheng, WANG Baohua, SHAN Xin. Photovoltaic power distribution network in adaptive distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 141-147.
- [13] 张玉, 黄睿, 张振涛, 等. 基于克里格模型的光伏发电量预测[J]. 热力发电, 2017, 46(4): 27-32.
ZHANG Yu, HUANG Rui, ZHANG Zhentao, et al. Photovoltaic power generation prediction based on Kriging model[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(4): 27-32.
- [14] 张尧, 晁勤, 王厚军, 等. 基于自适应分支系数的并网光伏电站接地距离保护[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 113-117.
ZHANG Yao, CHAO Qin, WANG Houjun, et al. The grounding distance protection of grid-connected photovoltaic power station based on adaptive branch coefficient[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 113-117.
- [15] HE Jinghan, LIU Lin, DING Fanfan, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.
- [16] 蔡燕春, 董凯达, 张少凡, 等. 10 kV 配电线路高阻接地检测技术[J]. 广东电力, 2017, 30(10): 126-131.
CAI Yanchun, DONG Kaida, ZHANG Shaofan, et al. Detection technology for high resistance grounding of 10 kV power distribution lines[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(10): 126-131.
- [17] 侯俊杰, 樊艳芳, 钟显, 等. 适应于风电接入系统的抗高阻接地时域方程距离保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 122-128.
HOU Junjie, FAN Yanfang, ZHONG Xian, et al. Research on high resistance grounding time domain equation based distance protection for wind power accessed power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 122-128.
- [18] 王鹤, 刘宇超, 李国庆, 等. 接入 MMC-HVDC 的交流系统线路自适应距离保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 7-13.
- WANG He, LIU Yuchao, LI Guoqing, et al. Adaptive distance protection of AC system in the presence of modular multilevel converter based HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 7-13.
- [19] ZHANG Zhikui, ZHENG Tao, XIE Ruirui. Protection for distribution network with photovoltaic integration[C] // 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference, October 25-28, 2016, Xi'an, China: 1-6.
- [20] 陈彬. 基于稳态特征的配电网小电流接地故障定位方法[J]. 广东电力, 2017, 30(10): 116-120.
CHEN Bin. Grounding fault location method for small current of power distribution network based on steady-state characteristic[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(10): 116-120.
- [21] 黄少锋, 曹凯, 罗澜. 一种消除过渡电阻影响的阻抗测量方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 108-113.
HUANG Shaofeng, CAO Kai, LUO Lan. Integrated modeling and model maintenance of on-line monitoring system in substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 108-113.
- [22] 葛耀中. 改进继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 46-52.
- [23] 张保会, 尹根硕. 电力系统继电保护[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2010: 1-20.

收稿日期: 2018-10-31; 修回日期: 2018-12-09

作者简介:

王峰渊(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网技术管理; E-mail: wfypower@163.com

方愉冬(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: fang_yudong@zj.sgcc.com.cn

赵萍(1963—), 女, 通信作者, 本科, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: tzdyjzp@163.com

(编辑 葛艳娜)