

引用格式: 卢正飞, 文明浩, 周瑜, 等. 逆变型分布式电源接入变电站高压线路距离保护新方法[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(2): 59-67.

Citation: LU Zhengfei, WEN Minghao, ZHOU Yu, et al. A novel distance protection method for high-voltage line in substation with integration of inverter-interfaced distributed generator[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 59-67.

逆变型分布式电源接入变电站高压线路 距离保护新方法

卢正飞¹, 文明浩², 周瑜¹, 晋龙兴¹, 马 帅¹

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001; 2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 直驱式风电机组、光伏发电机组等逆变型分布式电源的强波动性、时空随机性和故障期间非线性受控特性给现有电网继电保护带来了严峻挑战。逆变型分布式电源(inverter-interfaced distributed generator, IIDG)接入变电站高压线路后发生的故障远比传统同步机电源接入高压线路的故障更复杂, 采用传统的正序电压极化的比相式距离保护难以适应这种新出现的故障, 其对电网的保护性能下降, 逆变型分布式电源故障特性导致正序电压极化的传统比相式距离保护做出不正确动作。基于保护安装处的电气量特征, 提出一种采用工频相量计算的高压线路距离保护新方法。当保护安装处的故障电压较高时, 将保护安装处电压作为极化电压, 构建比相式距离保护, 正确判断故障距离; 当保护安装处的故障电压较低时, 通过保护安装处记忆电压与流过保护安装处电流相位关系来判断该故障方向。仿真结果表明, 该距离保护方法保护性能良好, 不受故障位置、故障类型等因素的影响。所提距离保护方法适用于含 IIDG 接入电网交流线路保护, 且不存在保护出口故障死区。

关 键 词: 逆变型分布式电源; 交流线路; 距离保护; 故障特性

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.02.007

中图分类号: TM771

文章编号: 1673-9140(2025)02-0059-09

A novel distance protection method for high-voltage line in substation with integration of inverter-interfaced distributed generator

LU Zhengfei¹, WEN Minghao², ZHOU Yu¹, JIN Longxing¹, MA Shuai¹

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518001, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The strong variability, spatiotemporal randomness, and nonlinear controlled characteristics during faults of inverter-interfaced distributed generators (IIDGs) such as direct-drive wind turbines and photovoltaic generators pose significant challenges to the existing relay protection systems in power grids. When faults occur in high-voltage lines of substations with integration of IIDGs, the fault characteristics are more complex compared to those in the case of the access of traditional synchronous machine sources to high-voltage lines, which makes it difficult for conventional positive-sequence voltage-polarized phase-comparison distance protection to adapt to. As a result, the performance of protection for power grids deteriorates. This paper analyzes the reasons for the incorrect operation of traditional positive-sequence voltage-polarized phase-comparison distance protection due to the fault characteristics of IIDGs. Based on the electrical quantity characteristics at the protection installation point, it proposes a new method for distance protection of high-voltage lines by using power frequency phasor calculation. When the fault voltage at the protection installation point is relatively high, using the voltage at the protection installation point as the polarizing voltage for phase-comparison distance protection correctly determines the fault distance. For the low fault voltage at the protection installation point, the fault direction is determined by analyzing the phase relationship between the memory voltage at

收稿日期: 2023-09-04; 修回日期: 2024-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(52277103)

通信作者: 文明浩(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统继电保护等方面的研究; E-mail: swenmh@hust.edu.cn

the protection installation point and the current flowing through the point. Simulation results show that the proposed distance protection method exhibits excellent performance unaffected by factors such as fault location and fault type. The proposed distance protection method is applicable to AC line protection for power grids with the integration of IIDGs, and it eliminates the issue of blind zones of protection for outlet faults.

Key words: IIDG; AC line; distance protection; fault characteristic

随着新型电力系统的发展与风电、光伏等逆变器分布式电源(inverter-interfaced distributed generator, IIDG)规模的扩大,电力系统安全运行正在迎接前所未有的挑战^[1-6]。受风光出力的波动性、随机性与故障期间非线性受控特性等因素的影响, IIDG在发生故障后表现出了电流幅值受限、电流受控、电源阻抗变化等与同步发电机完全不同的故障特征^[7-16]。这些故障给电力系统的安全带来了不利影响,也给基于工频相量的传统保护体系带来了新的挑战。文献[17]报道了一起发生在中国的新能源电源事故,该事故由接入线路发生故障时保护做出不正确动作所引发。当 IIDG 接入变电站,高压线路发生故障时,迅速定位故障区段是及时隔离故障并恢复供电的关键。提出适应 IIDG 接入变电站高压线路的新保护方法,对提高供电可靠性有着十分重要的现实意义。

距离保护因其具备保护范围稳定、满足复杂电网选择性、灵敏性要求等优点,被广泛应用于高压交流线路保护中^[18]。目前,国内外学者已开展 IIDG 接入对线路距离保护的影响的研究^[19-26]。文献[19-21]指出,风电系统的弱馈性和系统阻抗的不稳定性使得基于工频变化量的距离保护不再适用。文献[23]指出,逆变器电源短路电流幅值受限与相角受控使得场站侧基于工频变化量的距离保护系统可能做出错误的动作指令。文献[25]发现受故障逆变器电源场站故障特性影响,送出线的四边形距离保护存在拒动和误动的可能。文献[26]指出分布式光伏弱电源特性会劣化距离元件耐受过度电阻的能力。

目前,高压交流线路通常采用比相式距离保护方法。为保证距离保护在出口短路故障时不出现电压死区,高压交流线路常将正序电压作为极化电压。通过分析 IIDG 接入对高压线路时正序电压极化比相式距离保护动作性能的影响,基于保护安装处电气量特征,本文提出一种新型距离保护方法。当 IIDG 接入变电站,高压线路发生故障时,保护安装处电压极化的距离保护具备良好的动作性能,但其存在保护出口故障死区的问题。

因此,当高压线路发生保护近区的严重故障,且保护安装处电压较低时,基于 IIDG 故障特性,先利用保护安装处记忆电压与故障电流的相位关系,有效区分交流线路的正向与反向出口类型故障;再采用保护安装处电压极化的距离保护,配合低电压元件一起工作;然后,低电压元件通过比较保护安装处正序电压幅值与低电压门槛值的大小,判断该故障是否为保护近区严重故障,并向断路器发出对应的保护动作结果;最后,在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上,搭建 IIDG 接入高压交流系统典型仿真模型。该仿真结果表明,本文所提出的距离保护方法适用于 IIDG 接入变电站高压线路保护,具备良好的保护性能。

1 IIDG 接入对比相式距离保护的影响

常规保护极化电压一般选取为保护安装处相电压正序分量作为距离保护判据^[27-29],其判据为

$$-90^\circ < \arg\left(-\frac{\dot{U}_{op}}{\dot{U}_{ref}}\right) < 90^\circ \quad (1)$$

式中, $\dot{U}_{op}$ 为保护安装处工作电压; $\dot{U}_{ref}$ 为极化电压。

在接地距离继电器中,工作电压计算式为

$$\dot{U}_{op} = \dot{U}_d - (\dot{I}_d + 3k\dot{I}_0)Z_{ZD} \quad (2)$$

式中, $\dot{U}_d$ 、 $\dot{I}_d$ 分别为保护安装处故障相电压、电流; k 为线路零序电流补偿系数; Z_{ZD} 为整定阻抗; $\dot{I}_0$ 为流过保护安装处零序电流。

此时,参考电压 $\dot{U}_{ref}$ 选取保护安装处故障相电压正序分量,记为 $\dot{U}_d$;极化电压采用保护安装处故障相电压正序分量。

在相间距离继电器中,其工作电压计算式为

$$\dot{U}_{op} = \dot{U}_{dd} - \dot{I}_{dd}Z_{ZD} \quad (3)$$

式中, $\dot{U}_{dd}$ 、 $\dot{I}_{dd}$ 分别为保护安装处故障对应相间电压、线电流。

此时,参考电压 U_{ref} 选取保护安装处故障相对应相间电压正序分量,记为 $\dot{U}_{dd}$ 。

以图 1 所示的 IIDG 接入系统线路发生短路故障为例,分析影响正序电压极化距离保护动作性能的关键因素。



图1 IIDG接入系统典型网络

Figure 1 Typical structure of IIDG integration into power grid

若该线路发生IIDG侧正向相间故障,则将式(1)中保护安装处工作电压与极化电压同时除以保护安装处故障对应线电流,即

$$\arg\left(\frac{(\dot{U}_{dd} - \dot{I}_{dd}Z_{ZD})/\dot{I}_{dd}}{(\dot{U}_{dd(1)}/\dot{U}_{dd})(\dot{U}_{dd}/\dot{I}_{dd})}\right) = \arg\left(\frac{\dot{Z}_{dd} - \dot{Z}_{ZD}}{\dot{Z}_{dd}}\right) - \theta \quad (4)$$

式中, Z_{dd} 为保护安装处测量阻抗, $Z_{dd} = \dot{U}_{dd}/\dot{I}_{dd}$; θ 为 $\dot{U}_{dd(1)}$ 和 $\dot{U}_{dd}$ 相位差。

由式(4)可知,由于整定阻抗与测量阻抗的相位角接近,该式右侧第一项为 0° 或 180° 。因此,如果此时采用正序电压极化的比相式距离保护,其性能会受到保护安装处故障相间电压和其正序分量之间相位差影响。文献[29-31]指出,故障相电流由IIDG故障输出电流与本地负荷电流组成。其中,IIDG故障输出电流的幅值和相位均会随IIDG故障前的有功出力与并网点电压跌落幅度而改变。这可能导致故障电流与线路保护安装处正序电压相位差范围变为 $[-180^\circ, 180^\circ]$,造成比相式距离保护失效。

当某IIDG接入电网交流线路发生正方向区内BC相间故障时,其交流系统侧和IIDG侧的保护安装处的故障相间电压与其正序分量之间的相位差示意分别如图2、3所示。从图2、3中可以看出,在该故障发生前,保护安装处 $\dot{U}_{dd(1)}$ 和 $\dot{U}_{dd}$ 相位差为 0° ; 在该故障发生后,交流系统安装处两者相位差稳态值约为 20° 。由式(4)可知,采用正序电压作为极化电压的比相式保护判据能正确判断故障位置;而IIDG侧发生故障后,相位差从 0° 变化为 110° 。由式

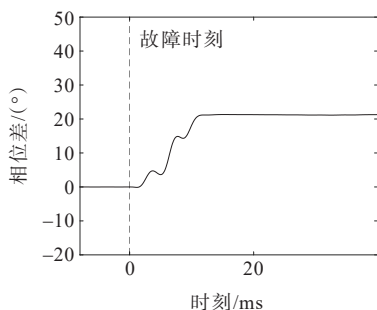


图2 相位差示意(交流系统侧)

Figure 2 Schematic diagram of phase difference (AC system side)

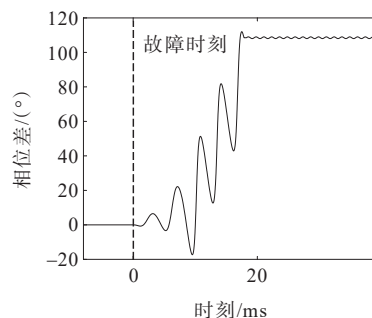


图3 相位差示意(IIDG侧)

Figure 3 Schematic diagram of phase difference (IIDG side)

(4)可知,由于此时的 θ 值超过 90° ,采用正序电压作为极化电压的比相式保护判据将不再满足,IIDG侧保护将不能进行正确动作。

2 新型距离保护

2.1 保护安装处电压极化距离保护元件

由式(4)可知,比相式距离保护动作性能受极化电压与保护安装处电压相位差这两者的共同影响。当选取保护安装处电压作为极化电压时,该电压相位差为 0° ,保护动作的性能最佳。基于此,根据选相元件判断结果,选取保护安装处电压作为极化电压,构建比相式距离判据的方法:当系统发生单相接地故障时,选取保护安装处故障相电压作为极化电压;当系统发生其他故障时,选取对应相间电压作为极化电压。

图4为典型IIDG接入电网的故障示意。在图4中,M、N分别位于线路IIDG侧、电网侧保护安装处。当交流线路MN的N侧为高压交流电网时,IIDG通过升压变接入M侧母线。从图4中可看出,当线路N侧发生正向故障,或者M侧发生反向故障时,流过保护安装处的电流由交流系统提供;当线路N侧发生反向故障,或者M侧发生正向故障时,流过保护安装处的电流由IIDG提供,故本文以IIDG侧为例进行分析。

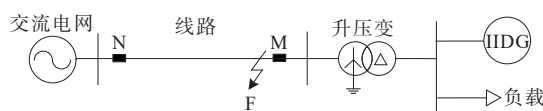


图4 IIDG接入电网故障示意

Figure 4 Faulty network of IIDG integration into power grid

在图4所示典型IIDG接入系统中,F为故障点。以保护安装处M为研究对象,对相间距离判据进行分析。将式(1)中保护安装处工作电压与极化电压同时除以保护安装处故障对应线电流,则式

(1)可改写为

$$\arg\left(\frac{\dot{U}_{op}}{\dot{U}_{ref}}\right) = \arg\left[\frac{(\dot{U}_{dd} - \dot{I}_{dd}\dot{Z}_{ZD})/\dot{I}_{dd}}{\dot{U}_{dd}/\dot{I}_{dd}}\right] = \arg\left(\frac{\dot{Z}_{dd} - \dot{Z}_{ZD}}{\dot{Z}_{dd}}\right) \quad (5)$$

线路测量阻抗与整定阻抗相位接近,故当发生区内故障时,式(5)的比相结果可近似为 -180° ;当发生区外故障时,式(5)的比相结果可近似为 0° 。因此,利用保护安装处电压极化构建保护时,保护应具有明确的保护边界,方能满足保护选择性要求。但保护出口近区发生金属性故障时,保护安装处故障相电压较低。由式(5)可知,当极化电压为 0 V 时,无法通过该判据判断故障方向,该方法存在保护死区。

2.2 采用记忆电压的保护出口方向元件

记忆电压因其具有能减小甚至消除死区,改善保护性能的优势,被广泛运用于保护方法之中。针对这些保护死区问题,当保护出口近区发生严重故障时,可利用故障电压的记忆量与故障电流相位关系判断故障位置。

2.2.1 保护正向出口故障

1) 单相接地故障。

以线路IIDG侧保护安装处M正向出口处发生A相单相接地故障为例,进行分析,故障点记为 F_1 ,该单相短路故障复合序网如图5所示。根据低电压穿越要求,在进行故障分析时,可将IIDG等值为受控正序电流源,其输出电流大小由PCC电压跌落程度决定^[32-34]。

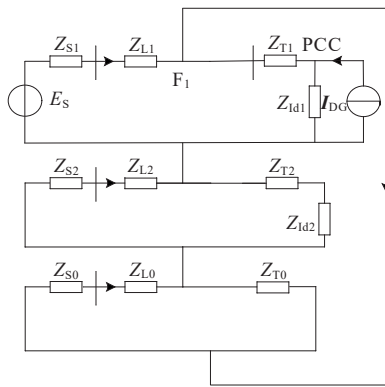


图5 单相短路故障复合序网

Figure 5 Composite sequence network of single-phase short circuit fault

在图5中, Z_{S1} 、 Z_{L1} 、 Z_{T1} 、 Z_{Ld1} 分别为交流电网、交流线路、变压器与负载正序等值阻抗; Z_{S2} 、 Z_{L2} 、 Z_{T2} 、 Z_{Ld2} 分别为交流电网、交流线路、变压器与负载正序等值阻抗; Z_{S0} 、 Z_{L0} 、 Z_{T0} 分别为交流电网、交流线路、

变压器等值阻抗; E_s 为交流系统等值电势;PCC为IIDG参考点; I_{DG} 为IIDG输出电流。

由于IIDG通常容量较小,且其会受到IIDG的电流限幅控制策略的影响,故IIDG表现出弱馈的故障特性。因此,保护安装处的开路电势可近似为电网侧电源电势^[22]。流过保护安装处M的电流相位主要由其零序分量决定,即

$$\dot{I}_{M0} \approx \frac{c_{m0} \dot{E}_s}{\dot{Z}_{S1} + \dot{Z}_{S2} + \dot{Z}_{S0}} \quad (6)$$

式中, $\dot{I}_{M0}$ 为流过保护安装处电流零序分量; Z_{S1} 、 Z_{S2} 、 Z_{S0} 分别为从故障点看入系统对应的正、负、零序等值阻抗; c_{m0} 为比例系数。

此时,补偿后的故障相电流以其零序分量为,主, E_s 与保护安装处M补偿后的故障电流 $\dot{I}_{MA} + 3k\dot{I}_{M0}$ 有关系,即

$$\arg\left(\frac{\dot{E}_s}{\dot{I}_{MA} + 3k\dot{I}_{M0}}\right) \approx \arg\left(\frac{\dot{E}_s}{\dot{I}_{M0}}\right) \approx 90^\circ \quad (7)$$

式中, $\dot{I}_{MA}$ 为保护安装A相电流。

综上所述,当系统正常运行时,保护安装处M的电压 $\dot{U}_M$ 主要由 $\dot{E}_s$ 决定。由于这两者相位接近,故障相记忆电压与故障电流相位关系为

$$\arg\left(\frac{\dot{U}_{MAm}}{\dot{I}_{MA} + 3k\dot{I}_{M0}}\right) \approx \arg\left(\frac{\dot{E}_s}{\dot{I}_{M0}}\right) \approx 90^\circ \quad (8)$$

式中, $\dot{U}_{MAm}$ 为保护安装处M的A相记忆电压。

2) 相间故障。

发生相间短路故障时,以线路IIDG侧保护安装处M正向出口 F_1 处发生BC相间短路故障为例进行分析。保护安装处相间电压等于IIDG提供的端口电压,其计算式为

$$\dot{I}_{MBC}(\dot{Z}_{T1} + \dot{Z}_{Ld1}) = \dot{I}_{DGBC} \dot{Z}_{Ld1} \quad (9)$$

式中, $\dot{I}_{MBC}$ 为保护安装处BC线电流; $\dot{I}_{DGBC}$ 为IIDG提供的线电流。

保护安装处电压正序分量 $\dot{U}_{MBC1}$ 与参考点PCC电压的正序分量 $\dot{U}_{PCCBC1}$ 关系式为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{MBC1} &= \dot{U}_{PCCBC1} - \dot{I}_{MBC} \dot{Z}_{T1} = \\ &= \dot{U}_{PCCBC1} - \frac{\dot{Z}_{Ld1} \dot{Z}_{T1}}{\dot{Z}_{T1} + \dot{Z}_{Ld1}} \dot{I}_{DGBC} \end{aligned} \quad (10)$$

发生故障时,根据新能源并网规程,IIDG提供的短路电流 $\dot{I}_{DG}$ 的 q 轴分量较大, d 轴分量较小,故 $\dot{I}_{DG}$ 相角滞后于 $\dot{U}_{PCCBC1}$ 相角的范围为 $[0^\circ, 90^\circ]$ 。由式(9)可知, $\dot{I}_{DGBC}$ 与 $\dot{I}_{MBC}$ 相位接近,由于IIDG弱馈故障特性, $\dot{I}_{MBC}$ 幅值较小, $\dot{I}_{MBC} \dot{Z}_{T1}$ 幅值小于 $\dot{U}_{PCCBC1}$ 的

幅值,故 $\dot{I}_{MBC}$ 的相角滞后于 $\dot{U}_{MBC1}$ 的相角的范围为 $[0^\circ, 90^\circ]$,该相位示意如图6所示。

根据序网分析可知,M处BC相间电压正序分量 $\dot{U}_{MBC1}$ 可近似为

$$\dot{U}_{MBC1} \approx \frac{\dot{Z}_{\Sigma 2}}{\dot{Z}_{\Sigma 1} + \dot{Z}_{\Sigma 2}} \dot{E}_{SBC} \quad (11)$$

式中, $\dot{E}_{SBC}$ 为等值电源BC相间电压。

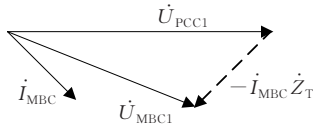


图6 相位示意

Figure 6 Phase diagram

由此可知,系统未发生故障时,保护安装处M记忆电压 $\dot{U}_{MBCm}$ 主要由 $\dot{E}_{SBC}$ 决定。这两者相位接近,故保护安装处故障记忆电压与故障电流相位关系为

$$0^\circ < \arg\left(\frac{\dot{U}_{MBCm}}{\dot{I}_{MBC}}\right) < 90^\circ \quad (12)$$

2.2.2 保护反向出口故障

由于IIDG容量较小,其提供电流能力弱于交流电网的,且IIDG侧阻抗、负载阻抗折算到高压侧的值通常远远大于交流系统侧的,故当系统正常运行时,保护安装处电压 $\dot{U}_M$ 可近似为

$$\dot{U}_M \approx \frac{\dot{Z}_{T1} + \dot{Z}_{kl1}}{\dot{Z}_{S1} + \dot{Z}_{L1} + \dot{Z}_{T1} + \dot{Z}_{kl1}} \dot{E}_s \approx \dot{E}_s \quad (13)$$

保护安装处M反向出口发生故障时,流过保护安装处M的电流由 $\dot{E}_s$ 提供,根据网络拓扑结构,则有

$$\arg\left(\frac{\dot{U}_{Mm}}{\dot{I}_M}\right) \approx \arg\left(\frac{\dot{E}_s}{\dot{I}_M}\right) \approx -\arg(\dot{Z}_{S1} + \dot{Z}_{L1}) \approx -90^\circ \quad (14)$$

式中,发生单相接地故障时, $\dot{U}_{Mm}$ 为保护安装处故障相电压记忆值; $\dot{I}_M$ 为流过M处经补偿后故障相电流;发生其他故障时, $\dot{U}_{Mm}$ 为M处故障相间电压记忆值; $\dot{I}_M$ 为M处故障相间电流。

由式(8)、(12)与(14)可知,当IIDG接入电网,交流线路出口发生故障时,故障相记忆电压与故障电流相角差在发生正、反向两种不同故障时存在较大差异。

2.3 实现方法

综上所述,当保护安装处电压较高时,可根据

故障类型选取保护安装处极化电压值,该判别式为

$$-90^\circ < \arg\left(-\frac{\dot{U}_{op}}{\dot{U}_f}\right) < 90^\circ \quad (15)$$

式中, $\dot{U}_f$ 为方向元件极化电压,接地继电器中选取保护安装处故障相电压,相间故障时选取对应故障相间电压。

针对保护安装处电压极化方法存在保护死区的问题,可通过比较保护安装处正序电压幅值与电压门槛值的大小来判断该故障是否为保护出口严重故障,该判据为

$$|\dot{U}_f| < k_{low} \dot{U}_{nor} \quad (16)$$

式中, $\dot{U}_f$ 为保护安装处正序电压幅值; $\dot{U}_{nor}$ 为系统额定电压幅值; k_{low} 为低电压系数。

当保护安装处电压较低,式(16)成立时,采用保护安装处电压极化的比相式保护不能做出正确的动作。此时,利用保护安装处故障电压的记忆量与故障电流进行比相,方能有效识别保护出口故障方向。其判据为

$$-45^\circ < \arg\left(\frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_f}\right) < 135^\circ \quad (17)$$

式中, $\dot{U}_m$ 根据故障类型选取保护安装处对应相电压或相间电压记忆量; $\dot{I}_f$ 根据选相结果选取对应故障电流。(接地故障时,其为经零序补偿后相电流;其他故障时,其为故障两相对应电流。)

将该判据与保护安装处电压极化比相式距离保护配合,构建新型距离保护方法,以交流线路IIDG侧为例,该保护流程如图7所示。

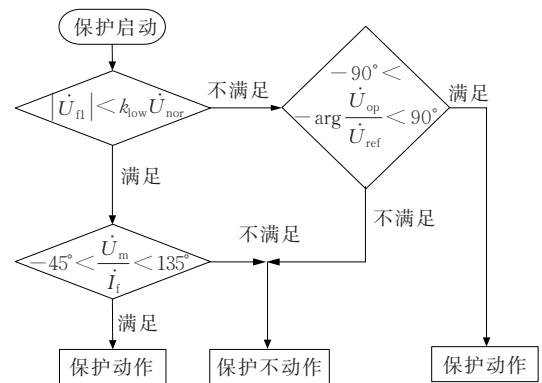


图7 IIDG侧保护流程

Figure 7 Protection process diagram of IIDG side

3 仿真结果与分析

3.1 仿真模型

基于PSCAD/EMTDC仿真平台,建立如图8

所示的典型 IIDG 接入交流系统仿真模型,对保护方案的性能进行验证,其系统参数见表 1。

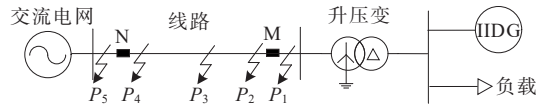


图 8 故障位置示意

Figure 8 Schematic diagram of fault location

在图 8 所示的系统中,模型采样率为 4 kHz,数据窗宽度选取为 20 ms。M、N 均为保护安装处,故障点为 P_1 、 P_2 分别为 M 侧反、正向出口, P_4 、 P_5 为 N 侧正、反向出口, P_3 为线路中点,故障发生时刻为 0.3 s,整定阻抗选取为线路正序阻抗的 80%,验证不同故障类型下本文所提新型距离元件动作方法的保护性能。

表 1 仿真系统相关参数

Table 1 Parameters of simulation system

系统正序 阻抗/ Ω	系统负序 阻抗/ Ω	系统零序 阻抗/ Ω	变压器 变比/kV	变压器容 量/MVA	变压器漏 抗/p.u.
0.220+j3.171	0.220+j3.171	0.300+j4.943	110/10	60	0.1
线路正序阻抗/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	线路负序阻抗/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	线路零序阻抗/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	线路长 度/km	IIDG 容 量/MW	
0.015+j0.320	0.015+j0.320	0.080+j0.926	20	30	

3.2 新型距离元件动作结果

线路发生金属性故障情况下,M、N 侧保护动作情况分别见表 2、3。由表 2、3 可知,当保护安装处反向出口发生故障时,保护不动作;正向出口和保护区内发生故障时,保护做出正确动作。

线路发生经过渡电阻短路故障情况下,以 M 侧为例的保护动作情况分别见表 4、5。由表 4、5 可知,当保护安装处反向出口发生故障时,保护不动作;正向出口和保护区内发生故障时,保护做出正确动作。

表 2 M 侧不同故障类型动作结果(金属性故障)

Table 2 Operation results for different fault types of M side (metallic fault)

故障类型	故障点 P_1 是否动作	故障点 P_2 动 作时间/ms	故障点 P_3 动 作时间/ms
AG	否	20	20
BC	否	20	20
BCG	否	20	20
ABC	否	20	20

表 3 N 侧不同故障类型动作结果(金属性)故障

Table 3 Operation results for different fault types of N side (metallic fault)

故障类型	故障点 P_3 动 作时间/ms	故障点 P_4 动作 时间/ms	故障点 P_5 是否动作
AG	20	20	否
BC	20	20	否
BCG	20	20	否
ABC	20	20	否

表 4 M 侧不同故障类型动作结果(单相接地故障)

Table 4 Operation results for different fault types of M side (single-phase earth fault)

过渡电阻/ Ω	故障点 P_1 是否动作	故障点 P_2 动作 时间/ms	故障点 P_3 动 作时间/ms
0	否	20	20
10	否	20	20
20	否	20	20
30	否	20	20

表 5 M 侧不同故障类型动作结果(三相故障)

Table 5 Operation results for different fault types of M side (three-phase fault)

过渡电阻/ Ω	故障点 P_1 是否动作	故障点 P_2 动作 时间/ms	故障点 P_3 动 作时间/ms
0	否	20	20
10	否	20	20
20	否	20	20
30	否	20	20

表 6 为以 M 侧正向出口故障为例,设计 3 种工况,不同逆变型电源容量和负荷情况下保护做出的动作时间。

- 1) 工况 1: IIDG 容量为 30 MW, 负荷为 30 kV · A。
- 2) 工况 2: IIDG 容量为 20 MW, 负荷为 10 kV · A。
- 3) 工况 3: IIDG 容量为 10 MW, 负荷为 20 kV · A。

表 6 不同逆变型电源容量与负荷情况下动作时间

Table 6 Operation time under different IIDG capacities and loads

故障类型	工况 1/ms	工况 2/ms	工况 3/ms
AG	20	20	20
BC	20	20	20
BCG	20	20	20
ABC	20	20	20

对于线路 IIDG 侧保护安装处 M,以区内外发生单相接地故障与相间短路故障情况为例,记 φ 为

工作电压 U_{op} 与故障电流 I_f 相位差, φ 随时间变化如图9、10所示。发生反向故障时,若不满足式(17)的判据,保护不动作;发生正向故障时,若满足式(17)的判据,保护做出动作。

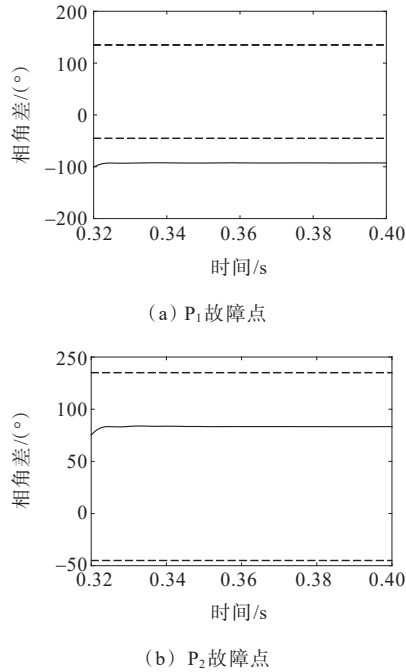


图9 IIDG侧仿真结果(AG)

Figure 9 Simulation results of IIDG side(AG)

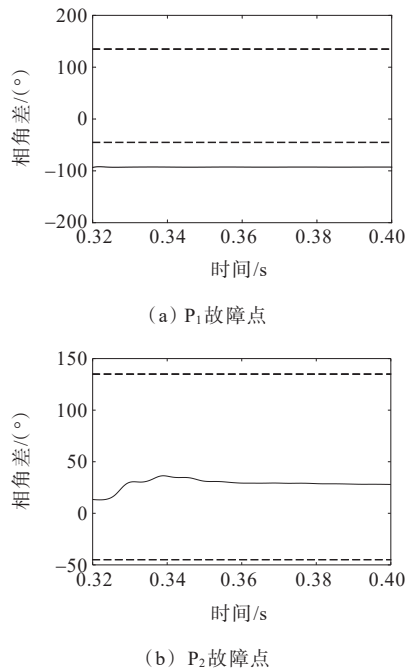


图10 IIDG侧仿真结果(BC)

Figure 10 Simulation results of IIDG side(BC)

由该仿真结果可知,本文所提新型距离保护方法在IIDG接入交流系统交流线路发生故障时,能够正确判断故障位置,满足保护速动性要求,且该方

法不受故障位置、逆变型电源容量、负荷大小、故障类型等因素影响。

4 结语

IIDG接入变电站高压线路发生故障时,IIDG故障特性比传统同步机电源的更复杂。因此,采用正序电压极化的比相式距离保护存在适应性问题;采用保护安装处电压极化的比相式距离保护具有清晰的保护边界,但在保护出口故障时存在死区问题。基于IIDG的故障特性,本文提出一种采用记忆电压的出口距离保护方法。以IIDG为例,当保护安装处正向出口发生故障时,故记忆电压与故障电流相位差范围为 $[0^\circ, 90^\circ]$;保护安装处反向出口发生故障时,记忆电压与故障电流相位差接近 -90° 。所提出的距离保护原理与保护安装处电压极化比相式距离保护,配合低电压元件,构建了新型距离保护方法。仿真分析表明,该保护方法能在IIDG接入变电站高压线路发生故障时做出正确动作,其动作性能优于采用正序电压极化的比相式距离保护方法的动作性能,且该方法不受故障位置、逆变型电源容量、负荷大小、故障类型等因素的影响。

参考文献:

- [1] 何廷一,李胜男,陈亦平,等.高比例新能源电网多源最优协同调频策略[J].电力建设,2021,42(10):51-59.
HE Tingyi, LI Shengnan, CHEN Yiping, et al. Multi-source optimal coordinated frequency regulation for power grid with high penetration of renewable energy[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(10): 51-59.
- [2] 董旭柱,华祝虎,尚磊,等.新型配电系统形态特征与技术展望[J].高电压技术,2021,47(9):3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.
- [3] 韩肖清,李廷钧,张东霞,等.双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J].高电压技术,2021,47(9):3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.
- [4] 林顺富,张琪,沈运帷,等.面向灵活爬坡服务的高比例新能源电力系统可调节资源优化调度模型[J].电力系统保护与控制,2024,52(2):90-100.
LIN Shunfu, ZHANG Qi, SHEN Yunwei, et al. Optimal dispatch model of adjustable resources in a power

- system with high proportion of renewable energy for flexible ramping product[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 90-100.
- [5] 李明扬, 张智. 基于强化学习的含分布式风-光-储虚拟电厂优化调度[J]. 智慧电力, 2024, 52(8): 50-56.
LI Mingyang, ZHANG Zhi. Optimal dispatch of distributed wind-solar-storage virtual power plants based on reinforcement learning[J]. Smart Power, 2024, 52(8): 50-56.
- [6] 黄兴华, 吴涵, 陈石川, 等. 考虑新能源出力的孤岛微网储能配置优化方法[J]. 中国电力, 2024, 57(12): 132-138.
HUANG Xinghua, WU Han, CHEN Shichuan, et al. An optimization method for energy storage configuration of isolated island microgrid considering new energy output[J]. Electric Power, 2024, 57(12): 132-138.
- [7] 朱彦名, 徐潇源, 严正, 等. 面向电力物联网的含可再生能源配电网运行展望[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 176-187.
ZHU Yanming, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Prospect of renewable energy integrated distribution network operation in the power Internet of Things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 176-187.
- [8] 姚琪, 苏川, 杨玉静, 等. 低碳背景下智能电网减排双目标调度规划方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(8): 134-140.
YAO Qi, SU Chuan, YANG Yujing, et al. A dual-objective scheduling planning method for smart grid emission reduction under low-carbon background[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(8): 134-140.
- [9] 林圣, 兰菲燕, 刘健, 等. 高压直流输电送端电网暂态过电压机理与抑制策略综述[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 3-16.
LIN Sheng, LAN Feiyan, LIU Jian, et al. Overview of transient overvoltage mechanism and suppression strategies of high voltage direct current transmission grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 3-16.
- [10] 杨博, 刘炳强, 蒋晓涵, 等. 大规模风电场并网暂态保护技术综述[J]. 热力发电, 2023, 52(3): 13-25.
YANG Bo, LIU Bingqiang, JIANG Xiaohan, et al. A survey of transient protection technologies of large-scale wind farm integration[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(3): 13-25.
- [11] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74+13.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74+13.
- [12] 吴佳庆, 顾洁, 金之俭, 等. 基于长短期记忆网络和模糊 C 均值聚类的配电网故障预警方法研究[J]. 供用电, 2023, 40(10): 63-72.
WU Jiaqing, GU Jie, JIN Zhijian, et al. Research on distribution network fault warning method based on long short-term memory network and fuzzy C-means clustering[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(10): 63-72.
- [13] 李泽文, 肖仁平, 杜昱东, 等. 集中式光伏并网输电线路的故障暂态分析与保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 120-128.
LI Zewen, XIAO Renping, DU Yudong, et al. Fault transient analysis and protection for transmission lines with integration of centralized photovoltaic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 120-128.
- [14] 张政伟, 陈谦, 牛应灏, 等. 基于实时生成定值的高比例新能源电网自适应电流保护[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 137-146.
ZHANG Zhengwei, CHEN Qian, NIU Yinghao, et al. Real-time generated protection settings based adaptive current protection for transmission line considering high proportion of new energy source[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 137-146.
- [15] 戴志辉, 张艺宏, 于礼瑞, 等. 适用于新型配电网的改进型电流保护[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2024, 51(1): 1-9+19+10.
DAI Zhihui, ZHANG Yihong, YU Lirui, et al. Improved current protection suitable for new distribution network[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2024, 51(1): 1-9+19+10.
- [16] 李彬, 杜丁香, 王兴国, 等. 基于平均绝对误差的海上风电经柔直送出系统交流海缆纵联保护[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 122-129.
LI Bin, DU Dingxiang, WANG Xingguo, et al. AC submarine cable pilot protection for offshore wind power through MMC-HVDC system based on mean absolute error[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 122-129.
- [17] 张保会, 王进, 原博, 等. 风电接入对继电保护的影响(四): 风电场送出线路保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 1-5+11.
ZHANG Baohui, WANG Jin, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection(4): performance analysis for wind farm outgoing transmission line protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 1-5+11.
- [18] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 62.
ZHANG Baohui, YIN Xianggen. Power system protective relaying[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 62.

- [19] 王晨清,宋国兵,汤海雁,等.距离保护在风电接入系统中的适应性分析[J].电力系统自动化,2015,39(22):10-15.
WANG Chenqing, SONG Guobing, TANG Haiyan, et al. Adaptability analysis of distance protection in power system integration with wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 10-15.
- [20] 滕予非,行武,张宏图,等.风力发电系统短路故障特征分析及对保护的影响[J].电力系统保护与控制,2015,43(19):29-36.
TENG Yufei, XING Wu, ZHANG Hongtu, et al. Analysis of characteristics of short circuit fault of wind power system and the impact on the protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 29-36.
- [21] 田波,张越,蒙飞,等.电网故障处置信息自适应理解框架及关键技术[J].中国电力,2024,57(7):188-195.
TIAN Bo, ZHANG Yue, MENG Fei, et al. Adaptive understanding framework and key technology of power grid fault disposal information[J]. Electric Power, 2024, 57(7): 188-195.
- [22] FANG Y, JIA K, YANG Z, et al. Impact of inverter-interfaced renewable energy generators on distance protection and an improved scheme[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(9): 7078-7088.
- [23] 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.
- [24] 伍美娟,陈阳,梁振锋,等.架空-电缆混合线路接地故障距离保护整定研究[J].电网与清洁能源,2024,40(6):77-83.
WU Meijuan, CHEN Yang, LIANG Zhenfeng, et al. A study on setting of ground-fault distance protection for the overhead-cable hybrid line[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(6): 77-83.
- [25] HOOSHYAR A, AZZOUZ 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 马静,马伟,闫新,等.基于电压相位比较的单相接地距离保护方案[J].电网技术,2015,39(7):2010-2016.
MA Jing, MA Wei, YAN Xin, et al. Voltage phase comparison based single-phase grounding distance protection scheme[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 2010-2016.
- [29] 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.
- [30] 易洋,骆雅姿,张子瑜,等.集中式光伏电站汇集系统故障分析与保护方案[J].电力工程技术,2021,40(2):2-10.
YI Yang, LUO Yazhi, ZHANG Ziyu, et al. Failure analysis and protection scheme of centralized photovoltaic power station convergence system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 2-10.
- [31] 赵宇洋,徐慧慧,田云飞,等.基于融合注意力机制自编码器的配网光伏逆变器故障检测[J].智慧电力,2024,52(11):1-7.
ZHAO Yuyang, XU Huihui, TIAN Yunfei, et al. Fault detection in grid-connected photovoltaic inverters using an autoencoder integrated with attention mechanism[J]. Smart Power, 2024, 52(11): 1-7.
- [32] 王秀莲,崔云龙,胡广,等.RT-LAB的光伏并网系统零电压穿越技术实现[J].沈阳理工大学学报,2017,36(4):19-23.
WANG Xiulian, CUI Yunlong, HU Guang, et al. Zero voltage ride-through technology implementation on grid-connected photovoltaic system on RT-LAB[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2017, 36(4): 19-23.
- [33] 丁保迪,季宇,王永刚,等.面向多能互补微网的故障辨识与继电保护算法[J].电力建设,2020,41(4):10-21.
DING Baodi, JI Yu, WANG Yonggang, et al. Fault identification method and relay protection algorithm for multi-energy complementary microgrid[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(4): 10-21.
- [34] 孙仲民,顾乔根,张晓宇,等.分接开关可控移相变压器保护配置及故障特征分析[J].电力系统保护与控制,2024,52(14):121-131.
SUN Zhongmin, GU Qiaogen, ZHANG Xiaoyu, et al. Protection configuration and fault characteristics analysis of a tap-changer controllable phase-shifting transformer[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 121-131.