

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230586

基于控保协同的有源配网主动注入式保护方法

戴志辉, 吴桐, 何静远, 赵 蹇

(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: 由于逆变型分布式电源(inverter-interfaced distributed generation, IIDG)的故障特性主要由其控制策略及电网故障情况决定, 在不同故障场景和工况下, 传统的被动式保护方法存在保护整定和协调困难的问题。为此, 提出一种基于控保协同的有源配网主动注入式保护方法, 故障期间控制 IIDG 主动向电网注入特征信号, 保护处利用检测到的特征信号来获取 IIDG 的基波信息, 从而消除 IIDG 对各支路电流及现有电流保护的影响。由于保护利用的故障特征是由 IIDG 主动注入的, 因此该方法在不同场景和工况下都有较好的适用性, 且不需要增加额外的通信和检测设备, 具有经济性好和实用性高的优点。仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 逆变型分布式电源; 主动注入式保护; 控保协同; 有源配网; 协调控制

An active distribution network active injection protection method based on control-protection coordination

DAI Zhihui, WU Tong, HE Jingyuan, ZHAO Jian

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

Abstract: Since the fault characteristics of inverter-interfaced distributed generation (IIDG) are mainly determined by its control strategy and grid fault conditions, the traditional passive protection method suffers from difficulties in protection rectification and coordination in different fault scenarios and operating conditions. Thus an active distribution network active injection protection method based on control and protection coordination is proposed, in which the IIDG is controlled to actively inject characteristic signals into the grid during faults. The protection uses the detected characteristic signals to extract the fundamental information of the IIDG, thus eliminating the influence of the IIDG on each branch current and existing current protection. Since the fault features used by the protection are actively injected by the IIDG, the proposed method has good applicability in different scenarios and operating conditions, and does not require additional communication and detection equipment. This has the advantages of good economy and high practicality. The simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

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

Key words: inverter-interfaced distributed generator; active injection protection; control and protection synergy; active distribution network; coordinated control

0 引言

随着新能源发电技术的快速发展, 以直驱风机和光伏为代表的逆变型分布式电源在配网内的渗透率逐年增加^[1-3], 其对配网保护的影响也越来越显著^[4-5]。不同于传统同步发电机, 故障期间 IIDG 的输出特性受环境因素和控制策略的影响较大^[6], 给有源配网的保护带来一系列新的问题: 1) 由于电力

电子器件的耐过流能力较差, 故障期间 IIDG 输出的短路电流是受限的, 一般为额定电流的 1~2 倍, 其故障特征不明显^[7]; 2) 受外界环境和控制策略多样性的影响, 故障期间 IIDG 输出的电流幅值和相位难以确定^[8-9]; 3) IIDG 的接入使得配网不再是单端网络, 其故障电流将助增或减小流过线路保护处的电流, 改变配网的故障特征^[10]; 4) 由于配网内的通信条件和检测设备有限, 在有限的故障信息下如何准确地判断出故障位置也是目前待解决的问题之一^[11]。上述问题给配网保护的整定和协调带来很多

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877084)

困难, 传统保护难以满足有源配网保护的技术要求。

目前, 针对 IIDG 接入场景下配网保护的改善方法包括: 在线实时更新定值的自适应电流保护和基于区域信息的集中式网络化保护等。自适应电流保护是在传统电流保护的基础上利用本地信息或者电网中其他节点信息来实时更新定值的一种保护方法。文献[12]结合 IIDG 的控制策略, 对不同的故障位置和故障类型分别提出了对应的电流保护定值的整定计算方法; 文献[13]针对 IIDG 接入后导致上游电流保护灵敏度降低的问题, 提出一种在正常运行期间通过在线迭代计算来实时更新电流保护定值的方法; 文献[14]将配网划分为 IIDG 上游、下游和并网线路三个区域, 并对不同区域分别提出了具有针对性的电流保护改进方案。集中式网络化保护是利用与故障相关的多点、多类型信息, 来确定故障位置的一种保护方法^[15]。文献[15]在分析新能源接入对配网电流保护影响的基础上, 通过构建正、反向和防孤岛反向故障跳闸矩阵, 以实现故障位置的判断; 文献[16]通过计算保护区域内各元件的故障综合信息值, 以实现故障位置的判断。上述方法有助于改善保护性能, 但都过于依赖各种测量装置及通信设备, 且由于上述方法都只是被动地适应新能源的故障特性, 其保护方案存在配置复杂和适用场景较为单一的问题^[17]。

不同于被动适应故障特性的传统保护, 主动注入式保护是利用 IIDG 的逆变器主动向电网注入特征信号, 保护利用特征信号提供的信息来判断是否应该动作^[18]。由于保护检测到的故障特征是由 IIDG 主动注入的, 因此主动注入式保护在各类故障场景和工况下都有较好的适用性。文献[9]针对 IIDG 正序分量阻抗角相位不确定的问题, 提出在故障初期可将 IIDG 的正序分量阻抗角控制为给定值, 在保证方向元件正确识别故障方向后再将 IIDG 的控制策略切换至低电压穿越控制; 文献[19]提出一种微电网主动注入式保护方法, 通过合理设置 IIDG 注入谐波的节点、强度和时, 来向保护传递含故障位置特征的谐波信息, 保护处可根据所在区域内的谐波电流特征来判断故障位置; 文献[20]针对 IIDG 送出线上距离保护的弱馈放大问题, 提出一种基于谐波注入式的距离保护方法, 保护处通过测量谐波阻抗来解决过渡电阻的弱馈放大问题; 文献[21]分析总结了以往主动注入式方法的不足, 并在此基础上对注入信号的启动判据和控制器进行了重新设计, 最后提出了一种多 IIDG 协同配合的微电网保护思路。

本文考虑利用 IIDG 的灵活性和快速性, 控制 IIDG 在故障期间向电网主动注入一定的特征信号, 增加保护处可利用的故障信息, 进而实现控制与保护间的协调配合。首先结合 IIDG 的控制策略, 分析了其故障特性, 并按故障位置和类型对 IIDG 接入配网后对电流保护的影响进行了分类讨论; 接着对特征信号的注入方式、类型及其在电网中的分布进行了分析; 然后在以上分析的基础上, 提出一种基于控保协同的有源配网主动注入式保护方法; 最后, 通过仿真验证了所提方法的有效性。

1 IIDG 接入对有源配网保护的影响分析

本节以图 1 所示的有源配网常用辐射型拓扑结构为例, 研究 IIDG 接入后对有源配网保护的影响。

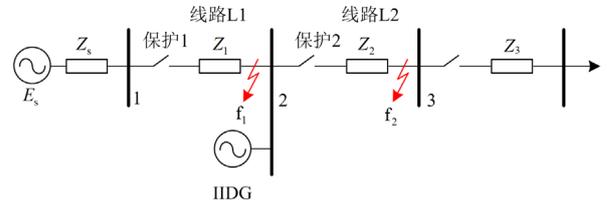


图 1 含 IIDG 的有源配网拓扑图

Fig. 1 Active distribution network topology with IIDG

1.1 IIDG 的故障特性分析

IIDG 的故障特性与其控制策略密切相关, 其基本的拓扑结构和控制系统如图 2 所示。

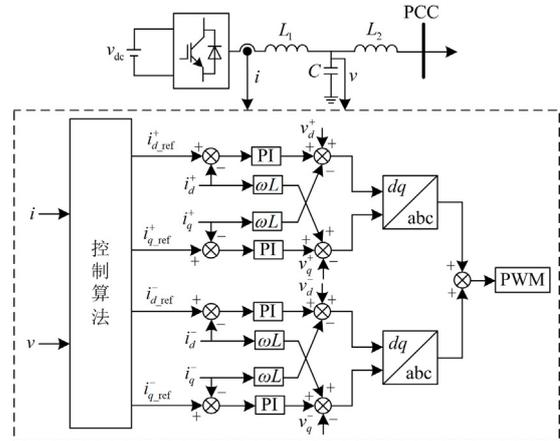


图 2 IIDG 拓扑结构及控制系统

Fig. 2 Topology and control system of IIDG

由图 2 可知, IIDG 的故障特性主要由其控制算法给出的正、负序 dq 轴电流的参考值来决定。对于正序电流分量, IIDG 一般采用优先输出无功的控制策略, 其正序 dq 轴电流参考值的计算公式如式(1)所示; 对于负序电流分量, IIDG 一般采用抑制负序电流的控制策略, 即控制负序 dq 轴电流参考值为 0。

$$\begin{cases} i_{q_ref} = \begin{cases} 2(0.9 - \frac{U}{U_N})I_N & 0.3 \leq \frac{U}{U_N} \leq 0.9 \\ 1.2I_N & \frac{U}{U_N} < 0.3 \end{cases} \\ i_{d_ref} = \min(\frac{P}{U}, \sqrt{(1.2I_N)^2 - i_q^2}) \\ i_L = \sqrt{i_{d_ref}^2 + i_{q_ref}^2} \angle \arctan \frac{i_{q_ref}}{i_{d_ref}} \end{cases} \quad (1)$$

式中： i_{d_ref} 、 i_{q_ref} 分别为正序 dq 轴电流的参考值； I_N 、 U_N 分别为 IIDG 的额定电流和电压； U 为并网点电压； P 为故障前 IIDG 输出的功率； i_L 为故障期间 IIDG 输出的电流。

1.2 IIDG 接入对电流保护的影响

1.2.1 故障点位于 IIDG 上游时对保护的影响

1) 两相短路

以线路 L1 末端发生 BC 两相短路为例进行分析，其等值电路如图 3 所示。图中： I_{Bs} 、 I_{Cs} 为系统侧提供的电流； I_{AL} 、 I_{BL} 、 I_{CL} 为 IIDG 提供的电流； Z_1 为线路 L1 阻抗。

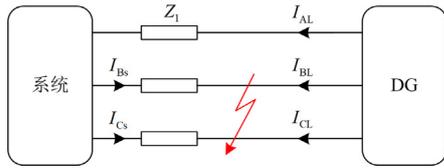


图 3 IIDG 上游两相短路时的等值电路

Fig. 3 Equivalent circuit of IIDG upstream two-phase short circuit

由图 3 可知，忽略负荷电流时，流过保护 1 的非故障相电流为 IIDG 提供的 I_{AL} ，故障相电流还需进一步结合复合序网图进行分析。

由于故障期间 IIDG 输出的负序电流为 0，因此在负序网络中 IIDG 侧为开路，IIDG 上游发生 BC 两相短路时的复合序网图如图 4 所示。图中， E_s 和 Z_s 分别为大电网的电势和阻抗，此时流过故障点 f 的正、负序电流 I_f^+ 、 I_f^- 如式(2)所示。

$$I_f^+ = -I_f^- = \frac{E_s}{2(Z_s + Z_1)} + \frac{1}{2} I_{AL} \quad (2)$$

根据故障电路的正序和负序网络可推导出此时流过保护 1 的正、负序电流 I_{p1}^+ 、 I_{p1}^- ，如式(3)所示。

$$\begin{cases} I_{p1}^+ = \frac{E_s}{2(Z_s + Z_1)} - \frac{1}{2} I_{AL} \\ I_{p1}^- = -\frac{E_s}{2(Z_s + Z_1)} - \frac{1}{2} I_{AL} \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)变换至 abc 坐标系下，可推得流过保护 1 的故障相电流 I_{Bp1} 和 I_{Cp1} ，如式(4)所示。

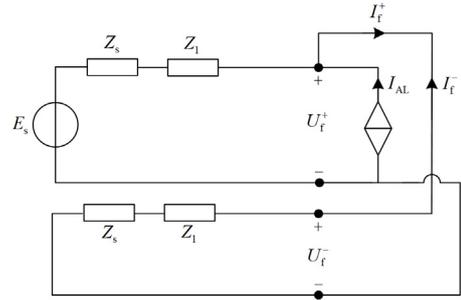


图 4 IIDG 上游两相短路时的复合序网图

Fig. 4 Composite sequence network diagram of IIDG upstream two-phase short circuit

$$\begin{cases} I_{Bp1} = -j \frac{\sqrt{3}E_s}{2(Z_s + Z_1)} + \frac{1}{2} I_{AL} \\ I_{Cp1} = j \frac{\sqrt{3}E_s}{2(Z_s + Z_1)} + \frac{1}{2} I_{AL} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知， f_1 点发生两相短路时 IIDG 的接入会导致流过保护 1 的故障相电流一相增大，另一相减小。因此，IIDG 上游两相短路时，IIDG 的接入会增大保护 1 动作的可能性，严重情况下可能会导致其误动。

2) 三相短路

当线路 L1 末端发生三相短路时，流过保护 1 的故障电流仅由大电网侧提供，此时 IIDG 的接入不会对保护 1 产生影响。

1.2.2 故障点位于 IIDG 下游时对保护的影响

1) 两相短路

以线路 L2 末端发生 BC 两相短路为例进行分析，其等值电路如图 5 所示。图中： Z_2 为线路 L2 阻抗，其他变量定义同 1.2.1 节。

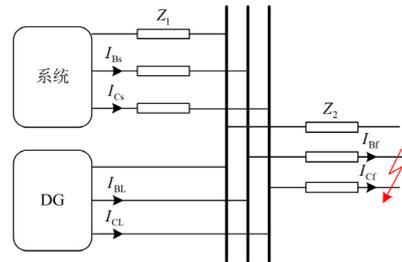


图 5 IIDG 下游两相短路时的等值电路

Fig. 5 Equivalent circuit of IIDG downstream two-phase short circuit

IIDG 下游发生 BC 两相短路时的复合序网图如图 6 所示，此时流过保护 2 的正、负序电流 I_{p2}^+ 、 I_{p2}^- 如式(5)所示。

$$I_{p2}^+ = -I_{p2}^- = \frac{E_s}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} + \frac{I_{AL}(Z_s + Z_1)}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} \quad (5)$$

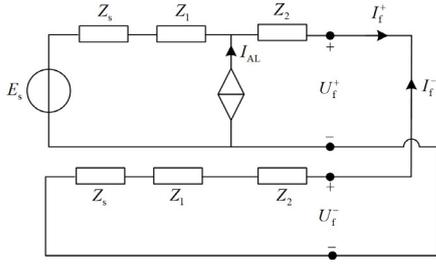


图 6 下游两相短路时的复合序网图

Fig. 6 Composite sequence network diagram of IIDG downstream two-phase short circuit

由故障电路的正序和负序网络可推导得到流过保护 1 的正、负序电流 I_{p1}^+ 、 I_{p1}^- ，如式(6)所示。

$$\begin{cases} I_{p1}^+ = \frac{E_s}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} - \frac{I_{AL}(Z_s + Z_1 + 2Z_2)}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} \\ I_{p1}^- = -\frac{E_s}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} - \frac{I_{AL}(Z_s + Z_1)}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} \end{cases} \quad (6)$$

将式(5)和式(6)变换至 abc 坐标系下, 可推得流过保护 1 的故障相电流 I_{Bp1} 、 I_{Cp1} 和流过保护 2 的故障相电流 I_{Bp2} 、 I_{Cp2} , 分别如式(7)和式(8)所示。

$$\begin{cases} I_{Bp1} = \frac{-j\sqrt{3}E_s}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} + \frac{I_{AL}(Z_s + Z_1) - 2I_{BL}Z_2}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} \\ I_{Cp1} = \frac{j\sqrt{3}E_s}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} + \frac{I_{AL}(Z_s + Z_1) - 2I_{CL}Z_2}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} I_{Bp2} = -j\sqrt{3} \left[\frac{E_s}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} + \frac{I_{AL}(Z_s + Z_1)}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} \right] \\ I_{Cp2} = j\sqrt{3} \left[\frac{E_s}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} + \frac{I_{AL}(Z_s + Z_1)}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} \right] \end{cases} \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可知, f_2 点发生两相短路时, IIDG 会对保护 2 产生助增作用, 增大保护 2 动作的可能性, 且 IIDG 和故障点的距离越近, 影响会越大; 对于保护 1 的影响与 1.2.1 节分析类似, 同样也会导致流过保护 1 的电流增大, 增大保护 1 动作的可能性。

2) 三相短路

以线路 L2 末端发生三相短路为例进行分析, 其复合序网图如图 7 所示, 此时流过保护 1、保护 2 的三相电流 I_{p1} 、 I_{p2} 如式(9)所示。

$$\begin{cases} I_{p1} = \frac{E_s}{Z_s + Z_1 + Z_2} - \frac{I_L Z_2}{Z_s + Z_1 + Z_2} \\ I_{p2} = \frac{E_s}{Z_s + Z_1 + Z_2} + \frac{I_L(Z_s + Z_1)}{Z_s + Z_1 + Z_2} \end{cases} \quad (9)$$

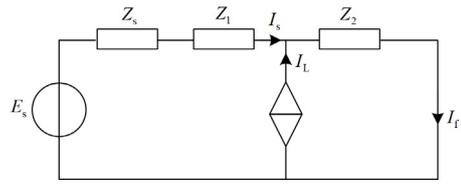


图 7 IIDG 下游三相短路时的复合序网图

Fig. 7 Composite sequence network diagram of IIDG downstream three-phase short circuit

由式(9)可知, 当 f_2 点发生三相短路时, IIDG 的接入会导致流过保护 1 的电流减少, 降低其作为远后备保护的灵敏度; 对于保护 2, IIDG 的接入会对流过保护 2 的电流产生助增作用, 严重情况下甚至可能导致保护 2 误动。

1.3 小结

根据以上分析可知, 由于 IIDG 特殊的故障特性, 传统电流保护用于有源配网中时存在保护误动和灵敏度下降的问题。为此, 本文考虑利用 IIDG 控制策略的灵活性, 通过控制 IIDG 向电网注入一定的特征信号, 保护处利用特征信号所提供的信息以解决传统电流保护用于有源配网时所出现的问题。下面首先对特征信号的选取原则及控制方案进行说明论证。

2 特征信号的选择及控制方案

2.1 注入启动判据

在系统内发生故障后, IIDG 存在因并网点电压和频率偏离过多而脱网的风险, 因此在故障发生后 IIDG 应迅速识别故障并向电网注入特征信号, 其实现依赖于快速、可靠的注入启动判据。

出于可靠性和快速性的考虑, 特征信号的注入启动判据应尽量利用 IIDG 的本地信息^[21]。当系统故障时, IIDG 的并网点电压会发生一定程度的跌落, 可利用这一特征作为特征信号的注入启动判据之一, 即当 IIDG 的并网点最小相电压 $U_{\min} < 0.9U_N$ 时, 说明系统内发生了故障。若系统内的故障为不对称故障时, 也可利用负序电压的幅值特征作为特征信号的注入启动判据之一, 即当并网点负序电压 $U^- \geq 0.01U_N$ 时, 说明系统内发生了不对称故障。同时, 若系统内存在多 IIDG 情况, 也可将特征信号电流幅值作为注入启动的补充判据, 即当检测到的特征电流幅值 $I_k \geq I_{set}$ 时, 说明系统内部分 IIDG 的特征信号注入环节已启动, 从而使得部分远离故障点(并网点电压跌落程度较小)的 IIDG 也能启动特征信号的注入, I_{set} 的取值需要综合考虑电网内的背景谐波和注入启动的灵敏性, 其值可取(2%~5%) $I_{DG,N}$ ^[21]。

当上述三个判据满足其中一个时即可认为系统内发生了故障，IIDG 启动特征信号注入环节。

2.2 特征信号的注入方式

现有的主动注入式保护中，部分方案通过在调制信号馈入 PWM 前，在原有信号的基础上叠加一高次谐波以实现特征信号的注入，其采用开环控制的方法，虽然实现起来较为简单，但无法实现对注入特征信号的灵活控制，尤其是在不对称故障时，其无法消除输出特征信号的负序分量。

为实现对特征信号的灵活控制，本文采用的 IIDG 特征信号注入流程如图 8 所示。图中： $i_{dq_ref}^+$ 和 $i_{dq_ref}^-$ 分别表示基频正、负序有功和无功电流参考值； i_{kdq_ref} 表示特征频率有功和无功电流参考值。其中特征频率电流控制环采用比例谐振控制实现对指令的快速追踪，此外将特征频次负序电压分量前馈至调制波中以起到抑制特征频率负序电流的作用^[22-23]，特征频率控制环的传递函数如式(10)所示^[22]。

$$u_{\alpha\beta}^M = \left[k_p + \frac{k_r s}{s^2 + (k\omega_N)} \right] (i_{k\alpha\beta_ref} - i_{k\alpha\beta}) + u_{\alpha\beta}^- \quad (10)$$

式中： $u_{\alpha\beta}$ 为调制电压在 $\alpha\beta$ 坐标系下的分量； $i_{k\alpha\beta_ref}$ 和 $i_{k\alpha\beta}$ 分别为特征频率电流的参考值和实际值； k_p 、 k_r 均为 PR 控制器比例谐振系数； ω_N 为电网基频电压角频率。

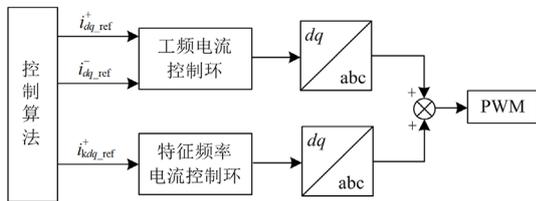


图 8 特征信号的注入流程
Fig. 8 Injection flow of characteristic signal

2.3 注入信号的选择

2.3.1 注入信号的频率

按上述控制结构，理论上可实现任意整数次谐波特征信号的注入，但在具体选择信号频率时应作以下三方面的考虑。

1) 由于特征信号在注入电网前还需要经过 IIDG 的并网滤波器，因此特征信号的频率须小于滤波器的截止频率，以避免谐振和衰减。IIDG 滤波器的谐振频率一般在 10 倍工频至 1/2 倍载波频率内，因此特征信号频率应小于 10 倍工频^[21]。

2) 由于故障初期扰动过大，电网内也会产生一定的谐波分量，且以低次谐波为主，因此为减少电网背景谐波对特征信号的影响，特征频率应尽量远

离工频^[21]。

3) 逆变器正常运行时因调制产生奇次谐波，电网背景谐波也以奇次为主，为强化系统故障特征宜选偶次谐波作为系统故障特征谐波^[22]。

综上，本文选择 8 倍频电流(400 Hz)作为特征信号，以优化电流保护性能。

2.3.2 注入信号的幅值

注入信号的幅值需要综合考虑保护处检测难度和电网电能质量的要求：注入特征信号的幅值过小会增加保护处识别检测的难度；幅值过大则会导致电网中的扰动超标，对电能质量带来负面影响^[22]。综合考虑两者影响，本文将特征信号的最大幅值设置为 IIDG 的 10% $I_{DG,max}$ 。

2.4 注入信号在电网中的分布

以下游两相短路为例，可得特征信号的复合序网，如图 9 所示。

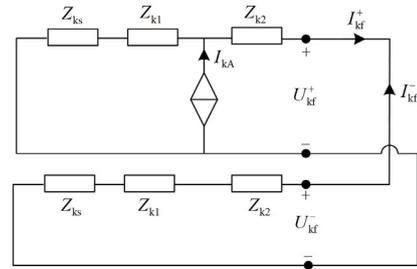


图 9 IIDG 下游两相短路时的特征信号复合序网图

Fig. 9 Composite sequence network diagram of feature signal in downstream two-phase short circuit

此时流过保护 1、2 的特征信号 I_{kBp1} 、 I_{kCp1} 和 I_{kBp2} 、 I_{kCp2} 分别如式(11)和式(12)所示。

$$\begin{cases} I_{kBp1} = \frac{I_{kA}(Z_{ks} + Z_{k1}) - 2I_{kB}Z_{k2}}{2(Z_{ks} + Z_{k1} + Z_{k2})} \\ I_{kCp1} = \frac{I_{kA}(Z_{ks} + Z_{k1}) - 2I_{kC}Z_{k2}}{2(Z_{ks} + Z_{k1} + Z_{k2})} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} I_{kBp2} = \frac{-j\sqrt{3}I_{kA}(Z_{ks} + Z_{k1})}{2(Z_{ks} + Z_{k1} + Z_{k2})} \\ I_{kCp2} = \frac{j\sqrt{3}I_{kA}(Z_{ks} + Z_{k1})}{2(Z_{ks} + Z_{k1} + Z_{k2})} \end{cases} \quad (12)$$

式中： I_{kA} 、 I_{kB} 和 I_{kC} 为 IIDG 输出的特征频率电流； Z_{ks} 、 Z_{k1} 和 Z_{k2} 分别为系统、线路 L1 和 L2 在特征频率下对应的阻抗。对比式(6)、式(7)和式(11)、式(12)可知，故障期间特征频率电流的分布与基波类似，因此若能明确两者的大小和相位关系，保护处即可利用检测到的特征频率电流的特征以计算出

IIDG 提供的基波电流, 从而消除 IIDG 接入配网后对电流保护的影响。

3 基于控保协同的主动注入式保护方法

3.1 故障类型判断方法

不同故障类型下, IIDG 对流过线路电流产生的影响不同, 因此保护处先对故障类型进行判断。由于电流保护主要用于相间短路, 因此判断故障类型时, 只需区分两相短路和三相短路两类故障。两相短路为不对称故障, 因此如果故障电流中存在负序分量, 则说明故障为两相短路, 否则为三相短路。

3.2 主动注入式保护方法

由 2.4 节分析可知, 通过合理地设置特征信号的幅值和相位即可计算出 IIDG 提供的基波电流, 从而消除 IIDG 提供的基波电流对保护的影响。根据 2.3.2 节分析可知, IIDG 输出的特征频率电流的最大值为 $10\%I_{DG,max}$, 因此将 IIDG 输出的基波电流和特征频率电流固定为 10 倍关系, 此时保护处 IIDG 的基波电流与特征频率电流的关系满足式(13)。

$$I_{p,DG} = 10I_{kp} \quad (13)$$

式中: $I_{p,DG}$ 为保护处 IIDG 提供的基波电流; I_{kp} 为保护处的特征频率电流。由式(13)可得保护处不受 IIDG 影响的基波电流 $I_{p,new}$ 的计算公式, 如式(14)所示。

$$I_{p,new} = I_p - I_{p,DG} \quad (14)$$

式中, I_p 为保护处的基波电流。由式(4)、式(7)和式(8)可得, 两相短路时 IIDG 对于上、下游保护的影响并不完全相同, 为计算出 $I_{p,new}$, 还需对故障点位置进行判断。但保护处获得的信息有限, 难以准确判断故障点位置。为避免上述问题, 对于两相短路时需要有一个统一的计算公式。以下游两相短路为例进行分析, 对故障电流作如下变换, 如式(15)所示。

$$\begin{cases} I_{p1} = \frac{I_{Bp1} - I_{Cp1}}{2} = \frac{-j\sqrt{3}E_s}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} + \frac{jI_{AL}Z_2}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} \\ I_{p2} = \frac{I_{Bp2} - I_{Cp2}}{2} = \frac{-j\sqrt{3}E_s}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} + \frac{-jI_{AL}Z_2}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} \end{cases} \quad (15)$$

特征信号经变化后可得

$$\begin{cases} I_{kp1} = \frac{I_{kBp1} - I_{kCp1}}{2} = \frac{jI_{kA}Z_{k2}}{2(Z_{ks} + Z_{k1} + Z_{k2})} \\ I_{kp2} = \frac{I_{kBp2} - I_{kCp2}}{2} = \frac{-jI_{kA}Z_{k2}}{2(Z_{ks} + Z_{k1} + Z_{k2})} \end{cases} \quad (16)$$

因此, IIDG 下游两相短路时保护处不受 IIDG

影响的基波电流计算如式(17)所示, 对于 IIDG 上游两相短路, 式(17)同样适用。

$$I_{p,new} = I_p - I_{p,DG} = \frac{I_{Bp} - I_{Cp}}{2} - 10 \frac{I_{kBp} - I_{kCp}}{2} \quad (17)$$

需要注意的是, 上述分析是针对 BC 两相短路, 对于其他类型的两相短路, 只需把 $I_{Bp} - I_{Cp}$ 换成对应的故障相即可。对于三相短路, 保护 1 和 2 可直接按式(14)更新短路电流。

由于故障产生的扰动较大, 故障初期电网内也会产生一定的谐波信号, 但其会逐渐衰减至 0, 因此在计算电流前需保证检测到的特征信号稳定。特征信号的稳定判据见式(18), 在式(18)连续满足 5 次时即可判定特征信号稳定。

$$|I_{m+1} - I_m| < \varepsilon \quad (18)$$

式中: I_{m+1} 和 I_m 分别为经 FFT 分解后得到的第 $m+1$ 和第 m 个特征信号幅值; ε 为特征信号的允许误差, 本文取 $0.5\%I_{DG,N}$ 。综上, 基于控保协同的主动注入式保护方法流程如图 10 所示。

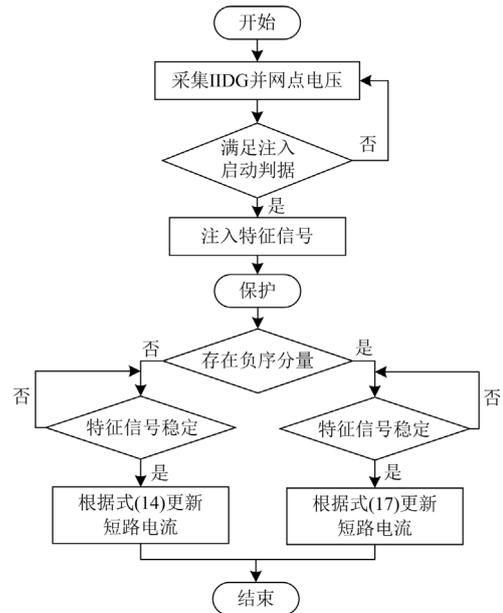


图 10 基于控保协同的主动注入式保护流程

Fig. 10 Active injection protection process based on control and protection coordination

3.3 IIDG 接入容量和接入数量对所提方法的影响

上述分析都只是针对单个 IIDG 接入配网的情况, 但在实际配网中 IIDG 的接入容量和接入数量往往是多样的, 本节针对 IIDG 接入容量和数量变化时对所提方法产生的影响进行分析。

3.3.1 IIDG 接入容量变化时对所提方法的影响

IIDG 接入容量的变化会对其故障期间输出的

基波电流的幅值大小产生影响, 但所提方法输出的特征频率电流幅值与基波电流幅值成固定的比例关系, 当 IIDG 接入容量变化时, 其输出的特征频率电流也会对应变化, 因此 IIDG 接入容量的变化不会对所提方法产生影响。

3.3.2 IIDG 接入数量变化时对所提方法的影响

上述讨论都只是针对单个 IIDG 接入的情况, 本节以图 11 所示的多 IIDG 有源配网拓扑为例, 来分析 IIDG 接入数量变化时对所提方法的影响。

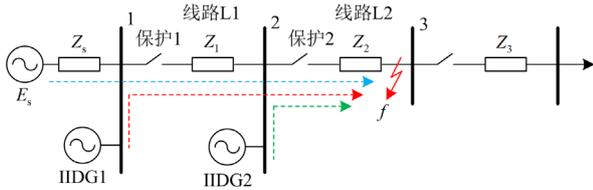


图 11 多 IIDG 接入的有源配网拓扑图

Fig. 11 Topology diagram of active distribution network with multiple IIDG access

如图 11 所示, 多 IIDG 情况下流过保护的故障电流将由电网提供的短路电流、IIDG1 和 IIDG2 输出的故障电流叠加而成。由式(1)可知, 当并网点电压跌落程度不同时, IIDG 输出的基波电流的相位也会不同, 因此此时流过保护的 IIDG1 和 IIDG2 的基波电流会存在一定的相位差。而所提方法输出的特征频率电流的相位是根据输出基波电流的相位确定的, 同时由 2.4 节分析可知, 特征频率电流与基波电流在电网中的分布基本相同, 因此此时流过保护的基波电流和 IIDG 提供的基波电流仍然满足式(13), 保护处流过的 IIDG 的故障电流关系如图 12 所示。

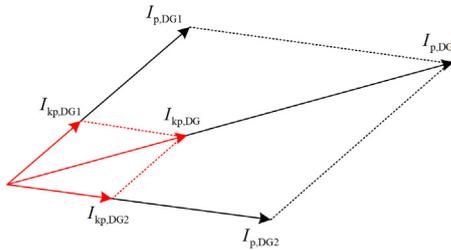


图 12 多 IIDG 接入情况下保护 2 处的电流分布

Fig. 12 Current distribution of protection 2 in the case of multiple IIDG access

由图 12 可知, 虽然各 IIDG 输出的基波电流相位可能不同, 但保护处检测到的特征频率电流仍能反映 IIDG 提供的基波电流的大小和相位, 因此 IIDG 接入数量的变化不会对所提方法产生影响。

4 仿真及结果分析

为验证所提方法的有效性, 基于 Simulink 建立如图 1 所示的含 IIDG 的有源配网拓扑图。系统侧额定电压为 10.5 kV, 系统阻抗为 $j0.5 \Omega$, 线路单位长度阻抗为 $0.27+j0.365 \Omega/\text{km}$, 线路 L1、L2 长度分别为 10 km 和 6 km。IIDG 的容量为 6 MW, 控制策略采用 1.1 节所述的优先输出无功和抑制负序电流策略。

4.1 f_2 点三相短路

设置在 $t = 0.2 \text{ s}$ 时 f_2 点处发生三相短路故障, IIDG 在检测到并网点电压跌落后, 向电网注入频率为 400 Hz 的特征信号, IIDG 输出的三相电流波形如图 13 所示, IIDG 输出的和保护处检测到的特征信号幅值如图 14 所示。

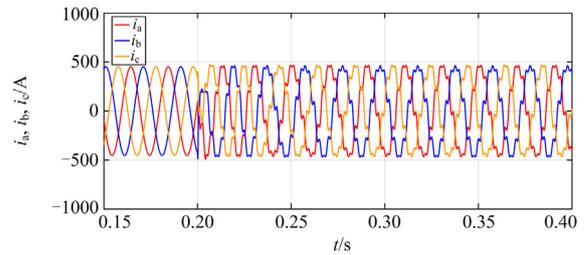


图 13 IIDG 输出的三相电流

Fig. 13 Three-phase current output from IIDG

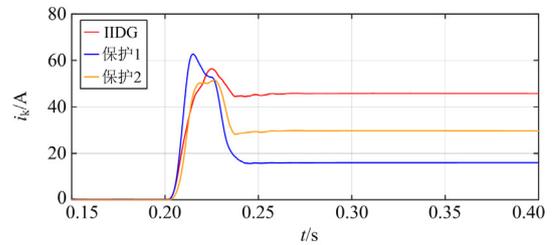


图 14 IIDG 输出的和保护处检测到的特征信号幅值

Fig. 14 Feature signal amplitude output from IIDG and at protection

由图 13 可知, IIDG 输出的三相电流波形因特征信号而产生一定畸变, 但总体输出稳定。由图 14 可知, 特征信号在 0.246 s 左右趋于稳定, 保护处根据特征信号的幅值和相位按式(13)和式(14)即可计算出不受 IIDG 影响的基波电流 $I_{p,new}$, 其计算结果和实测值对比见表 1。

4.2 f_2 点两相短路

设置在 $t = 0.2 \text{ s}$ 时 f_2 点处发生两相短路故障, 保护 1 处的三相电流波形如图 15 所示, 保护 2 处的三相电流波形如图 16 所示, 其中灰色虚线为 IIDG

未接入时流过保护的故障电流幅值。

表 1 IIDG 容量为 6 MVA 时保护处的实测值与计算值

Table 1 Measured and calculated values of protection when IIDG capacity is 6 MVA

故障类型	保护	IIDG 接入时的实测值/kA	IIDG 未接入时的实测值/kA	计算值/kA
f_2 三相短路	保护 1	1.031	1.117	1.120
	保护 2	1.324	1.117	1.121
f_2 两相短路	保护 1	1.107	0.967	0.963
	保护 2	1.147	0.967	0.966
f_1 两相短路	保护 1	1.701	1.499	1.499

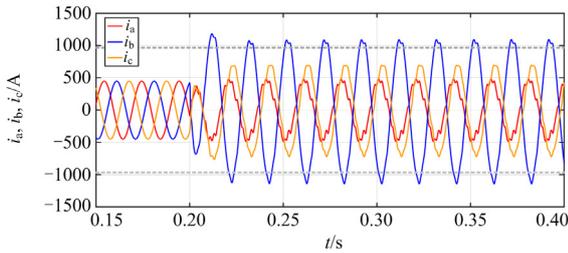


图 15 保护 1 处的三相电流

Fig. 15 Three-phase current at protection 1

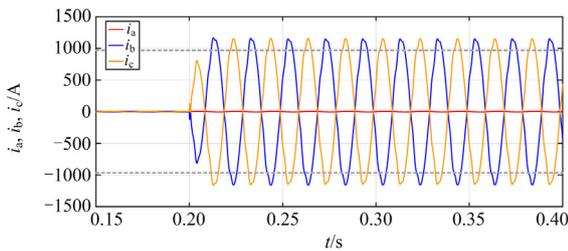


图 16 保护 2 处的三相电流

Fig. 16 Three-phase current at protection 2

由图 15 可知, IIDG 下游两相短路时, 保护 1 处的故障相电流一相增大, 另一相减小, 流过保护 1 的非故障相电流为 IIDG 提供的 I_{AL} , 仿真结果与 1.2 节分析一致。由图 16 可知, IIDG 下游两相短路时会导致保护 2 处故障相电流增大, 其仿真结果也与式(8)一致。保护处根据特征信号的幅值和相位按式(17)即可计算处不受 IIDG 影响的基波电流, 其计算结果和实测值对比见表 1。

4.3 f_1 点两相短路

设置在 $t = 0.2$ s 时 f_1 点处发生两相短路故障, 保护 1 处的三相电流波形如图 17 所示。

由图 17 可知, IIDG 上游两相短路时, 保护 1 处的故障相电流一相增大, 另一相减小, 流过保护 1 的非故障相电流为 IIDG 提供的 I_{AL} , 仿真结果与 1.2 节分析一致。保护处不受 IIDG 影响的基波电流计算结果和实测值对比见表 1。

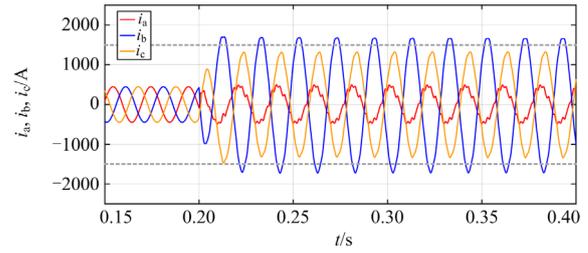


图 17 保护 1 处的三相电流

Fig. 17 Three-phase current at protection 1

由表 1 可以看出, 本文方法在不同的故障位置及故障类型下都能准确计算出保护处不受 IIDG 影响的基波电流, 能有效解决 IIDG 接入后电流保护出现的一些列问题。

4.4 IIDG 接入容量变化对保护性能的影响

以 f_2 点处发生三相短路故障为例, 对 IIDG 接入容量变化时对保护性能产生的影响进行分析, 不受 IIDG 影响的基波电流的计算值与实测值对比结果如表 2 所示。

表 2 IIDG 容量变化时保护处的实测值与计算值

Table 2 Measured and calculated values of the protection when the IIDG capacity changes

IIDG 的容量/MVA	保护	IIDG 接入时的实测值/kA	IIDG 未接入时的实测值/kA	计算值/kA
2	保护 1	1.081	1.117	1.119
	保护 2	1.191	1.117	1.118
4	保护 1	1.052	1.117	1.119
	保护 2	1.260	1.117	1.120
6	保护 1	1.031	1.117	1.120
	保护 2	1.324	1.117	1.121

由表 2 可以看出, IIDG 容量变化时保护处的计算值与 IIDG 未接入时的实测值基本相同, 因此 IIDG 接入容量的变化不会对所提方法产生影响。

4.5 IIDG 接入数量变化对保护性能的影响

以 f_2 点处发生三相短路故障为例, 对 IIDG 接入数量变化时对保护性能产生的影响进行分析, 多 IIDG 接入的有源配网拓扑如图 11 所示, 图中 IIDG1 和 IIDG2 的容量和参数完全相同。

多 IIDG 情况下不受 IIDG 影响的基波电流计算值与实测值对比结果如表 3 所示。由表 3 可以看出, 多 IIDG 情况下保护处的计算值与 IIDG 未接入时的实测值基本相同, 因此 IIDG 接入数量的变化不会对所提方法产生影响。

4.6 与现有保护方法的对比

所提方法与现有的电流保护改进方案对比如表 4 所示。现有的电流保护改进方案大致可分为自适应电流保护和集中式网络化保护两种思路。与自

适应保护相比，所提方法不需要增加额外的通信设施，也不需要修改保护的定值，其适用场景更为多样；与集中式网络化保护相比，所提方法不需要获取所有分支线路的信息，保护流程也更为简单。综上，所提方法具有经济性和配置简单的特点。

表 3 多 IIDG 情况下保护处的实测值与计算值

Table 3 Measured and calculated values of the protection in the case of multiple IIDG

kA				
故障类型	保护	IIDG 接入时的实测值	IIDG 未接入时的实测值	计算值
f ₂ 三相短路	保护 1	1.257	1.117	1.111
	保护 2	1.562	1.117	1.119
f ₂ 两相短路	保护 1	1.262	0.967	0.959
	保护 2	1.320	0.967	0.962
f ₁ 两相短路	保护 1	1.966	1.499	1.507

表 4 不同保护方案情况对比

Table 4 Comparison of different protection schemes

保护方案	通信要求	方案复杂程度
本文方法	无	无须修改保护定值；保护方案配置简单，且适用场景多样
自适应电流保护	保护处需获得所有 IIDG 的并网点电压和输出电流	保护配置复杂，不同区域线路需配置不同原理的保护
集中式网络化保护	中央保护单元需获得所有分支线路的电气信息	保护流程复杂，且对通信要求过高，难以保证较高的可靠性

5 结论

本文提出一种基于控保协同的有源配网主动注入式保护方法，故障期间控制 IIDG 向电网主动注入带有基波电流信息的特征信号，保护处利用检测到的特征信号的信息来计算不受 IIDG 影响的基波电流，从而实现控制与保护的协调配合。方法优点如下。

1) 无须对现有保护的整定方案进行调整，能计算出保护处不受 IIDG 影响的基波电流，从原理上消除了 IIDG 接入对现有电流保护的影响。

2) 不受 IIDG 接入容量和接入数量变化的影响，在各类故障类型和运行工况下都有较好的适用性。

3) 不需要增加额外的测量和通信设备，具有经济性好和实用性高的特点。

参考文献

[1] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20.
WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 10-20.

and Control, 2023, 51(6): 10-20.

[2] 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.

[3] 戴志辉, 李川, 焦彦军. IIDG 低压穿越模型及其在配网故障分析中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(7): 16-23.
DAI Zhihui, LI Chuan, JIAO Yanjun. Low-voltage ride through model of inverter-interfaced distributed generator and its application to fault analysis of distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2018, 30(7): 16-23.

[4] 彭生江, 陆军, 张中丹, 等. 光伏接入对电网的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 157-164.
PENG Shengjiang, LU Jun, ZHANG Zhongdan, et al. Research on the influence of photovoltaic access on a power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 157-164.

[5] 陈晓乾, 秦文萍, 杨乐, 等. 逆变式电源接入下的配电网自适应距离保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 27-38.
CHEN Xiaoqian, QIN Wenping, YANG Le, et al. Adaptive distance protection scheme for a distribution network given access of inverter power supply[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 27-38.

[6] 宋国兵, 陶然, 李斌, 等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 2-12.
SONG Guobing, TAO Ran, LI Bin, et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12.

[7] 谢民, 王同文, 徐靖东, 等. 分布式电源对配网继电保护影响及综合改进保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 78-84.
XIE Min, WANG Tongwen, XU Jingdong, et al. Effect of distributed power supply on distribution network relay protection and comprehensive improvement protection scheme[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 78-84.

[8] 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, MU Longhua, ZHANG Fan, et al. Microgrid protection considering low voltage ride-through of IIDG[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 110-119.

[9] 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.
- [10] 王鲍雅琼, 陈皓. 含分布式电源的配电网保护改进方案综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 146-154. WANG Baoyaqiong, CHEN Hao. Overview study on improving protection methods of distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 146-154.
- [11] 马静, 王希, 米超, 等. 含分布式电源的配电网自适应保护新方法[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 204-208. MA Jing, WANG Xi, MI Chao, et al. A new adaptive protection approach for distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 204-208.
- [12] 金甚达, 宋依群, 范春菊, 等. 考虑逆变电源控制策略的电流保护整定计算[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3690-3699. JIN Shenda, SONG Yiqun, FAN Chunju, et al. Calculation of current protection setting based on inverter generation control strategy[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3690-3699.
- [13] 袁智勇, 徐全, 徐刚, 等. 含大容量分布式电源接入的配电网电流保护优化方案[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1862-1868. YUAN Zhiyong, XU Quan, XU Gang, et al. Current protection optimization scheme in distribution network with large capacity distributed generators[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1862-1868.
- [14] 乔一达, 吴红斌, 吴通华, 等. 含逆变型分布式电源的配电网分区域电流保护[J]. 电工技术学报, 2022, 37(增刊 1): 134-144. QIAO Yida, WU Hongbin, WU Tonghua, et al. A partitioned current protection scheme of distribution network with inverter interfaced distributed generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(S1): 134-144.
- [15] 肖繁, 夏勇军, 张侃君, 等. 含新能源接入的配电网网络化保护原理研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 2): 709-719. XIAO Fan, XIA Yongjun, ZHANG Kanjun, et al. Research on a principle of networked protection in distribution network with renewable energy sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S2): 709-719.
- [16] 沈鑫, 曹敏. 分布式发电接入主动配电网区域保护算法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 352-357. SHEN Xin, CAO Min. Research on regional protection algorithm of distributed generation integration to active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 352-357.
- [17] 宋国兵, 王婷, 张保会, 等. 利用电力电子装置的探测式故障识别技术分析与发展[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 173-183. SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Baohui, et al. Analysis and protection of detective fault identification technologies using power electronic device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 173-183.
- [18] 侯俊杰, 宋国兵, 徐瑞东, 等. 交直流混合电网故障耦合特性分析与继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 176-187. HOU Junjie, SONG Guobing, XU Ruidong, et al. Fault coupling characteristic analysis and relay protection research on an AC/DC hybrid power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 176-187.
- [19] 张尔佳, 余墨多, 黄文焘, 等. 谐波能量注入式微电网主动保护方法[J/OL]. 电力系统自动化: 1-12[2023-03-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//32.1180.tp.20221207.1318.006.html> ZHANG Erjia, YU Moduo, HUANG Wentao, et al. An active protection scheme for microgrids based on the harmonic injection[J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-12[2023-03-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//32.1180.tp.20221207.1318.006.html>
- [20] YANG Z, ZHANG Q, LIAO W L, et al. Harmonic injection based distance protection for line with converter-interfaced sources[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(2): 1553-1564.
- [21] 方重凯, 牟龙华, 欧锐, 等. 基于控保协同的微电网注入式保护方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9): 3389-3402. FANG Chongkai, MU Longhua, OU Rui, et al. Research on control-protection coordination based injection protect scheme of microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3389-3402.
- [22] 贾科, 宣振文, 朱正轩, 等. 光伏直流升压接入系统故障穿越协同控保方法[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3249-3258. JIA Ke, XUAN Zhenwen, ZHU Zhengxuan, et al. A coordinated control and active protection for PV DC boosting integration system during FRT[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3249-3258.
- [23] 韦微, 王俊辉, 茹心芹, 等. 基于电网电压前馈补偿的光伏并网逆变器零电压穿越控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 78-84. WEI Zheng, WANG Junhui, RU Xinqin, et al. Zero voltage ride-through control strategy of photovoltaic grid-connected inverter based on compensation for phase of feed-forward grid voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 78-84.

收稿日期: 2023-05-19; 修回日期: 2023-08-14

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

吴桐(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。

(编辑 魏小丽)