

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.02.026

含逆变型分布式电源的配电网自适应电流保护方案

彭思敏¹, 李允博², 康童¹, 万代¹, 杨兰均²

(1. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 长沙 410007; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 针对逆变型分布式电源(inverter interfaced distributed generator, IIDG)接入对配电网传统三段式电流保护的影响问题,含IIDG配电网的保护受到越来越多的关注,对此,该文提出了一种含IIDG的配电网自适应电流保护方案。文中根据IIDG的故障特性和短路故障时配电网的序网络进行了理论分析,通过仿真验证了IIDG接入使配电网传统三段式电流保护拒动或者误动;提出了将故障前IIDG输出电流按区间分段后通信、电流保护装置迭代计算后进行整定的自适应电流保护方案,并通过仿真验证了含IIDG的配电网自适应电流保护方案的可靠性。提出的方案整定计算误差在允许范围内,大大减小了对通信同步性和通信量的要求,对含IIDG配电网自适应电流保护的应用具有重要价值。

关键词: 逆变型分布式电源; 配电网; 自适应电流保护; 区间分段

Adaptive Current Protection Scheme for Distribution Network with Inverted Interfaced Distributed Power Generator

PENG Simin¹, LI Yunbo², KANG Tong¹, WAN Dai¹, YANG Lanjun²

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Research Institute, Changsha 410007, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In view of the impact of access of inverter distributed generation(IIDG) on the traditional three-stage current protection of distribution network, the protection of distribution network including IIDG has received more and more attention. In this regard, an adaptive current protection scheme for distribution network with IIDG is proposed in this paper. In this paper, theoretical analysis is performed in accordance with the fault characteristics of IIDG and, in case of short circuit fault, the sequence network of the distribution network, and the refusal operation or mal-operation of the traditional three-stage current protection of the distribution network in case of access of IIDG are verified through simulation. An adaptive current protection scheme is proposed, which involves segmenting the output current of the pre-fault IIDG into intervals, performing iterative calculations for the communication and current protection devices, and then making the settings. The reliability of the distribution network adaptive current protection scheme with IIDG is verified by simulation. The setting calculation error of the proposed scheme is within the allowable error range, which greatly reduces the requirements for communication synchronization and communication volume, and is of great value to the application of adaptive current protection of distribution networks with IIDG.

Key words: inverted interfaced distributed generator; distribution network; adaptive current protection; interval segmentation

0 引言

随着碳达峰碳中和目标的推进,新能源发电大

量接入配电网,光伏等逆变型分布式电源(inverter interfaced distributed generator, IIDG)在配电网中的渗透率逐渐上升^[1-7]。不同于传统的旋转电机 DG,

收稿日期:2025-07-21; 修回日期:2025-10-11

基金项目:国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A5210035)。

Project Supported by State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Science and Technology Project(5216A5210035).

IIDG 因输出特性由逆变器控制策略决定, 而不能等效为电压源和阻抗的串联, 给含 IIDG 的配电网故障分析带来困难^[8-9]。国家电网对分布式电源接入配电网作出规定, 要求 IIDG 具有低电压穿越能力, 在配电网发生故障时能够持续运行至少 0.625 s 而不脱网, 同时能够随电网电压跌落程度的变化而输出无功功率支撑电网^[10-11]。传统的三段式电流保护一般在 0.5 s 内切除故障, IIDG 的低电压穿越持续电流保护动作的整个过程。低电压穿越使 IIDG 在配电网故障时具有很强的非线性, 同时 IIDG 输出受外界因素影响具有波动性, 含 IIDG 的配电网故障电流水平也随着 IIDG 输出功率的波动而变动, 可能导致配电网原有的三段式电流保护拒动或者误动^[12-13]。

对于上述问题, 大量学者展开了相关研究。文[14-18]将多用于 220 kV 及以上线路的纵联差动保护引入含 IIDG 配电网, 具有较好的速动性, 但对现有配电网改造成本过大的问题。文[19]提出了一种 IIDG 下游线路利用保护处测量的电气量计算 IIDG 输出电流从而进行整定计算的方法, 但对其上游线路的保护没有涉及。文[20]提出了一种计及 IIDG 控制策略的含 IIDG 配电网的自适应电流速断保护原理, 通过制造报文规范(MMS)服务获取 IIDG 功率参考值在线计算电流保护整定值, 但没有考虑故障发生在 IIDG 下游的情况。文[21]提出了一种分区域电流保护方案, 将配电网分为 IIDG 上游线路区域、下游线路区域和并网线路区域, 但存在保护和 IIDG 之间通信量过大的问题。文[22]分析了 IIDG 接入对配电网电流保护灵敏度的影响, 提出了一种根据 IIDG 实时运行参数调整限时电流速断保护整定值的方法, 但对电流速断保护的不足, 且同样存在通信量过大的问题。同时, 以上文献对保护和 IIDG 通信的网络安全都没有涉及。

文中根据 IIDG 低电压穿越的故障特性和故障等效模型, 分析了 IIDG 接入对配电网传统三段式电流保护的影响, 提出了一种利用 IIDG 输出电流计算电流保护整定值的自适应保护方案, 通过对 IIDG 输出电流的按区间分段取值后通信大大减小了对保护和 IIDG 间的通信量和通信同步性的要求, 又对保护和 IIDG 通信的网络安全进行讨论, 并在 MATLAB 中搭建含 IIDG 的配电网仿真模型, 验证了该方案的可靠性。

1 含 IIDG 配电网故障特性分析

10 kV 配电网大多采用辐射型网络, 含 IIDG 的

10 kV 配电网见图 1, IIDG 通过 0.4/10 kV 变压器并网接入 10 kV 线路, 保护 1-4 为安装在线路 L₁-L₄ 上的电流保护装置。

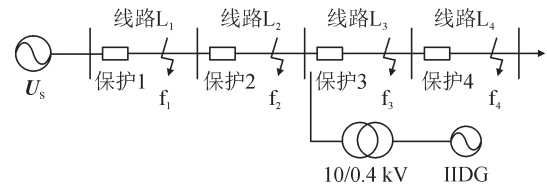


图1 含 IIDG 的 10 kV 配电网

Fig. 1 10 kV distribution network with IIDG

IIDG 并网拓扑见图 2, IIDG 一般采用 PQ 控制策略, 逆变器采集并网点 (point of common coupling, PCC) 电压 U_{PCC} 后通过锁相环得到电网电压的相位, 在两相同步旋转 $d-q$ 坐标系下, 通过 $abc-dq$ 变换得到逆变器输出电流 I_{abc} 的有功电流 I_d 和无功电流 I_q , 其参考值为 I_d^* 和 I_q^* , 逆变器的控制系统通过控制 I_d^* 和 I_q^* 实现有功功率和无功功率的控制^[23], 有功功率和无功功率参考值 P_{ref} 和 Q_{ref} 关系式为

$$\begin{cases} P_{ref} = \frac{3}{2} I_d^* U_{PCC} \\ Q_{ref} = \frac{3}{2} I_q^* U_{PCC} \end{cases} \quad (1)$$

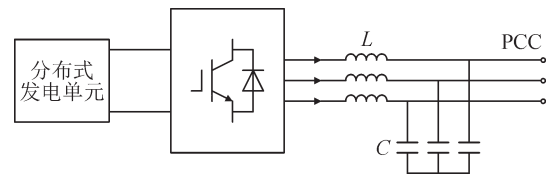


图2 IIDG 并网拓扑

Fig. 2 IIDG grid-connected topology

在正常运行时, IIDG 工作在单位功率因数状态, 只输出有功功率, 控制无功功率参考值 Q_{ref} 为 0。当配电网发生故障时, 并网点电压 U_{PCC} 发生跌落, 根据分布式电源并网规定, IIDG 不能立即退出运行, 而应该有低电压穿越能力继续运行一段时间, 并且能够随着电网电压跌落程度的加深输出无功功率用以支撑电网, 当电网电压跌落超过 10% IIDG 开始输出无功电流, IIDG 无功电流参考值 I_q^* 可表示为

$$I_q^* = K \left(0.9 - \frac{U_{PCC \cdot t}}{U_{PCC \cdot N}} \right) I_N \quad (2)$$

式(2)中: I_N 为 IIDG 故障前输出电流; K 为比例系数; $U_{PCC \cdot t}$ 为故障时并网点电压; $U_{PCC \cdot N}$ 为故障前并网点电压。

IIDG 有功电流参考值 I_d^* 可由式(1)计算得到, 当配电网发生短路故障并网点电压跌落时, 短时间内故障前后 IIDG 输出功率不变, 有功功率参考值 P_{ref} 不变, 有功电流参考值 I_d^* 增大, 由于 IIDG 输出电

流不能超过电力电子器件所能耐受的最大电流,要对电流参考值进行限幅,IIDG有功电流参考值 I_d^* 为

$$I_d^* = \min\left(\frac{2P_{ref}}{3U_{PCC \cdot f}}, \sqrt{I_{max}^2 - I_q^{*2}}\right) \quad (3)$$

式(3)中, I_{max} 为IIDG允许最大输出电流,一般为IIDG额定电流的1.2~1.5倍^[24]。

当配电网发生不对称故障时,并网点电压的负序分量会使逆变器输出电流含有负序分量和大量的低次谐波,为改善IIDG的输出性能,IIDG通常采用正负序分量分离的控制策略,通过分离正序电压进行锁相,同时将输出电流的负序分量控制为零,使IIDG在不对称故障时只输出正序电流^[25-26]。

IIDG的故障电流相量图见图3, $U_{PCC \cdot f(1)}$ 为并网点电压的正序分量, δ 为 $U_{PCC \cdot f(1)}$ 的相角,IIDG的故障电流表示为

$$I_{DG \cdot f} = (I_d^* \cos \delta + I_q^* \sin \delta) + j(I_d^* \sin \delta - I_q^* \cos \delta) \quad (4)$$

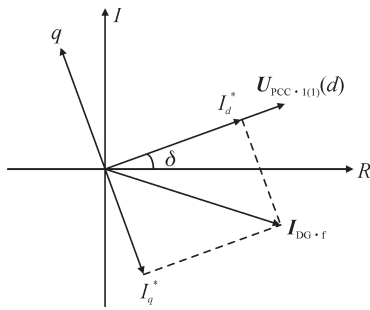


图3 IIDG故障电流向量图
Fig. 3 IIDG fault current vector diagram

由上述分析,在配电网发生故障时IIDG输出电流由并网点正序电压决定,等效为受并网点正序电压控制的压控电流源,表示为

$$I_{DG \cdot f} = f(U_{PCC \cdot f(1)}) \quad (5)$$

2 IIDG接入对配电网电流保护的影响分析

配电网传统三段式电流保护包括:电流速断保护、限时电流速断保护、定时限过电流保护。电流保护整定值的计算为:

$$I_{set,1}^I = K_{rel,1}^I I_{k,max} \quad (6)$$

$$I_{set,1}^{II} = K_{rel,1}^{II} I_{set,1}^I \quad (7)$$

$$I_{set,1}^{III} = K_{rel,1}^{III} \frac{K_{SS,1}}{K_{re,1}} I_{L,max} \quad (8)$$

式(6)-(8)中: $I_{set,1}^I$ 、 $I_{set,1}^{II}$ 、 $I_{set,1}^{III}$ 为本段线路电流速断保护、限时电流速断保护、定时限过电流保护的整定值; $I_{set,2}^I$ 为下一段线路的电流速断保护整定值; $K_{rel,1}^I$ 、 $K_{rel,1}^{II}$ 、 $K_{rel,1}^{III}$ 为可靠系数,一般为1.1~1.2; $K_{SS,1}$ 为自启动系数,一般大于1; $I_{k,max}$ 为本段线路末端

短路时流过保护的最大电流; $I_{L,max}$ 为本段线路上可能出现的最大负荷电流; $K_{re,1}$ 为电流继电器的返回系数,一般为0.85~0.95^[27]。

2.1 相间短路

IIDG在故障时只输出正序电流,因此只存在于故障序网络的正序网络当中,以图1配电网 f_2 处和 f_3 处发生BC相间短路为例分析故障发生在IIDG上游和下游时IIDG接入对配电网电流保护的影响,故障序网络见图4。 $Z_{1(1)}=Z_{1(2)}=Z_s+Z_{L1}+\alpha Z_{L2}$, $Z_{2(1)}=Z_{2(2)}=(1-\alpha)Z_{L2}$, $Z_{3(1)}=Z_{L3}+Z_{L4}+Z_A$, $Z_{4(1)}=Z_{4(2)}=Z_s+Z_{L1}+Z_{L2}$, $Z_{5(1)}=Z_{5(2)}=\alpha Z_{L3}$, $Z_{6(1)}=Z_{6(2)}=(1-\alpha)Z_{L3}+Z_{L4}+Z_A$, α 为故障点在故障线路的位置,在0~1之间取值, Z_{L1} - Z_{L4} 为线路 L_1 - L_4 阻抗, Z_s 为系统电源等效阻抗, Z_L 为IIDG接入变压器的等效阻抗, Z_A 为负荷等效阻抗。

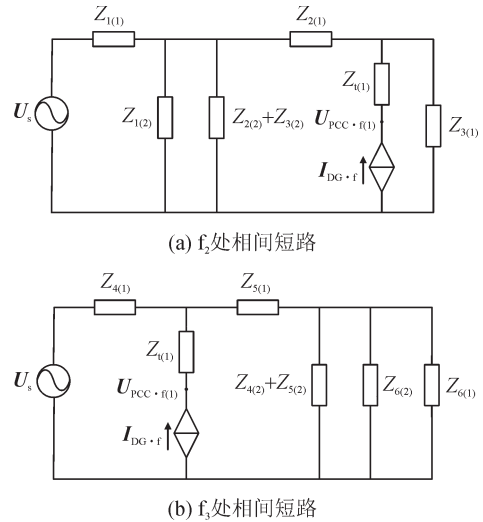


图4 相间短路故障序网络

Fig. 4 Phase-to-phase short-circuit fault sequence network

对于 f_2 处相间短路故障,由叠加定理,流过保护2的正负序电流为:

$$Z_k = Z_{1(1)} // Z_{1(2)} // (Z_{2(2)} + Z_{3(2)}) \quad (9)$$

$$I_{f2(1)} = \frac{U_s}{Z_{1(1)} + Z_{1(2)} // (Z_{2(2)} + Z_{3(2)}) // (Z_{2(1)} + Z_{3(1)})} - \frac{Z_k \cdot (Z_k + Z_{2(1)}) // Z_{3(1)}}{Z_{1(1)}} \quad (10)$$

$$I_{f2(2)} = -\frac{U_s - I_{f2(1)} Z_{1(1)}}{Z_{1(2)}} \quad (11)$$

对于 f_3 处相间短路故障,同理,流过保护3的正负序电流为:

$$Z_m = Z_{6(1)} // Z_{6(2)} // (Z_{4(2)} + Z_{5(2)}) \quad (12)$$

$$I_{f3(1)} = \frac{U_s}{Z_{4(1)} + Z_{5(1)} + Z_m} + I_{DG \cdot f} \frac{Z_{4(1)} // (Z_{5(1)} + Z_m)}{Z_{5(1)} + Z_m} \quad (13)$$

$$I_{f3(2)} = -I_{f3(1)} \frac{Z_m}{Z_{4(2)} + Z_{5(2)}} \quad (14)$$

由对称分量法, 流过保护的B、C相电流为:

$$I_B = e^{j240^\circ} I_{f(1)} + e^{j120^\circ} I_{f(2)} \quad (15)$$

$$I_C = e^{j120^\circ} I_{f(1)} + e^{j240^\circ} I_{f(2)} \quad (16)$$

IIDG的接入使配电网相间短路电流发生变化, 在MATLAB中搭建如图1所示的含IIDG的配电网仿真模型, 系统电源为10 kV, 等值电抗为 $0.09 + j1.702 \Omega$, 线路 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 长度均为5 km, 单位长度电抗为 $0.27 + j0.35 \Omega/\text{km}$, 系统负荷为5 MW, IIDG额定容量为3 MW, IIDG采用文中所述的低电压控制策略。

当IIDG输出功率为1 MW, 线路 L_2 末端发生BC相间短路故障前后保护2处电流波形, 见图5, IIDG输出电流见图6, 故障发生在0.04 s。由电流波形可得, IIDG的惯性时间常数很小, 故障发生后可以忽略其输出电流的暂态分量, IIDG的接入对配电网故障电流暂态分量没有影响, 保护流过的故障电流直流分量在半个周波衰减完毕。

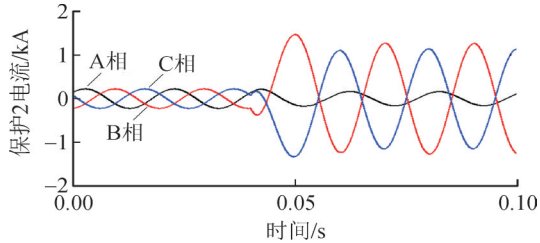


图5 线路 L_2 末端相间短路故障前后保护2电流

Fig. 5 Protection 2 current before and after the phase-to-phase short circuit fault at the end of line L_2

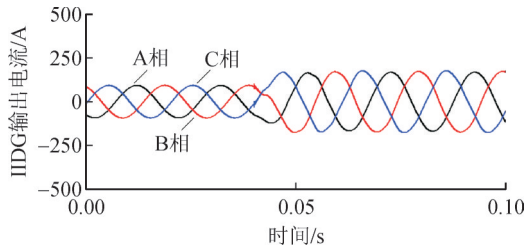


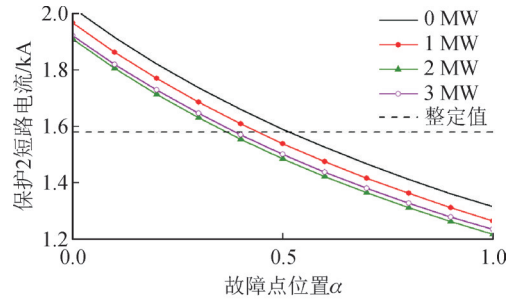
图6 线路 L_2 末端相间短路故障前后IIDG输出电流

Fig. 6 IIDG output current before and after

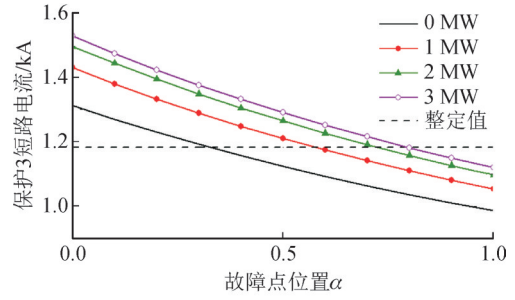
phase-to-phase short circuit fault at the end of L_2

线路 L_2 和 L_3 发生BC相间短路时, IIDG不同输出功率下流过保护2和保护3的短路电流(B相), 故障点位置与短路电流曲线见图7, 整定值为I段保护整定值。

由仿真结果可得, 当相间短路发生在IIDG上游即 f_2 处时, IIDG输出功率在额定功率内变化时, IIDG接入使保护2处短路电流减小, 线路 L_2 的I段保护



(a) f_2 处相间短路



(b) f_3 处相间短路

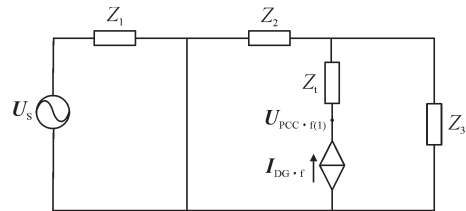
图7 故障点位置与相间短路电流曲线

Fig. 7 Fault point location and phase-to-phase short-circuit current curve

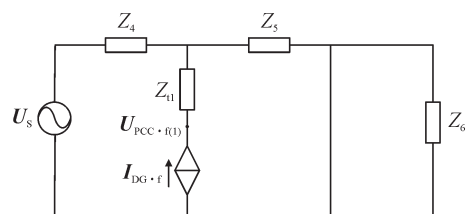
保护范围减小而发生拒动, 保护范围从线路的大于50%下降到约30%, 同时, 线路 L_2 的II段保护灵敏度下降; 当相间短路发生在IIDG下游即 f_3 处时, IIDG接入使保护3处短路电流增大, 线路 L_3 的I段保护保护范围增加, 但随着IIDG输出功率的增大, 线路 L_3 的I段保护整定值的裕度变小, 当线路 L_4 出口处发生相间短路故障时, 线路 L_3 的I段保护动作, 电流保护失去选择性发生误动。

2.2 三相短路

图1配电网 f_2 处和 f_4 处发生三相金属性短路故障, 故障序网络见图8。图8中, $Z_1 = Z_s + Z_{L1} + \alpha Z_{L2}$, $Z_2 = (1 - \alpha) Z_{L2}$, $Z_3 = Z_{L3} + Z_{L4} + Z_A$, $Z_4 = Z_s + Z_{L1} + Z_{L2}$, $Z_5 = Z_{L3} + \alpha Z_{L4}$, $Z_6 = (1 - \alpha) Z_{L4} + Z_A$, 变量表示与2.1节相同。



(a) f_2 处三相短路



(b) f_4 处三相短路

图8 三相短路故障序网络

Fig. 8 Three-phase short-circuit fault sequence network

对于 f_2 处三相短路故障,流过保护2的短路电流为

$$I_{f2} = \frac{U_s}{Z_1} \quad (17)$$

对于 f_4 处三相短路故障,由叠加定理,流过保护4的短路电流为

$$I_{f4} = \frac{U_s}{Z_4 + Z_5} + I_{DG} \cdot \frac{Z_4 // Z_5}{Z_5} \quad (18)$$

当三相短路故障发生IIDG上游,IIDG接入对配电网需要动作的保护的短路电流没有影响,而当三相短路故障发生在IIDG下游,IIDG的接入使保护处短路电流发生变化。

仿真线路 L_2 和 L_4 发生三相短路时,IIDG不同输出功率下流过保护2和保护4的短路电流,故障点位置与短路电流曲线见图9,整定值为I段保护整定值。

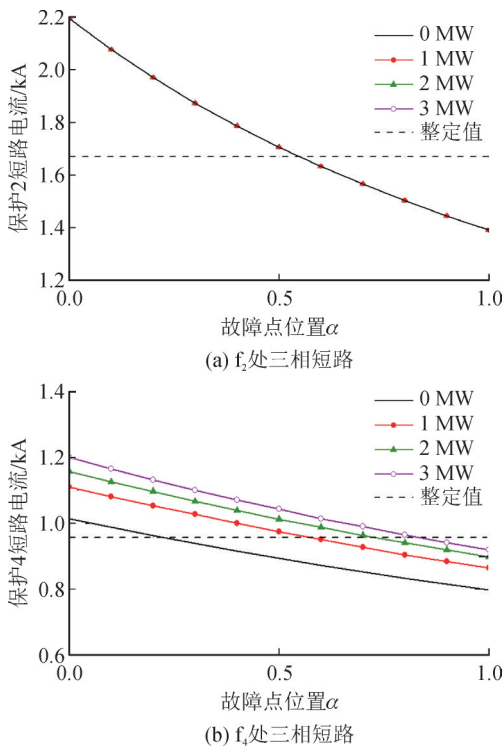


图9 故障点位置与三相短路电流曲线

Fig. 9 Fault location and three-phase short-circuit current curve

由仿真结果可得,当三相短路发生在IIDG上游即 f_2 处时,IIDG接入对保护2处短路电流没有影响,线路 L_2 的电流保护保护范围和灵敏度不变;当三相短路发生在IIDG下游即 f_4 处时,IIDG接入使保护4处短路电流增大,线路 L_4 的I段保护保护范围增加,但随着IIDG输出功率的增大,线路 L_4 的电流保护整定值的裕度减小。

3 自适应电流保护方案

由第2节分析,IIDG接入会导致配电网原有的三段式电流保护误动或者拒动,而IIDG输出功率具有不确定性,给含IIDG的配电网电流保护的整定计算造成困难。对此,文中提出一种自适应电流保护方案,电流保护装置通过通信模块获得IIDG输出电流,并通过运算模块计算电流保护所需的整定值,动态调整电流保护整定值,实现含IIDG配电网的自适应电流保护,同时,为了减小对通信量和实时性的要求,将IIDG输出电流分段取值,通过通信标识IIDG输出电流区间的的数据,实现IIDG输出电流的通信,含IIDG配电网的自适应电流保护过程如下:

1)IIDG并网点采集IIDG输出电流,对IIDG输出电流分段取值,如果IIDG输出电流区间发生变化,发送标识IIDG输出电流区间的的数据。

2)电流保护装置通信获得标识IIDG输出电流区间的的数据,用所标识区间的典型值作为当前IIDG的输出电流。

3)电流保护装置采用当前IIDG输出电流进行迭代计算,计算得到本段线路末端和下一段线路末端发生短路故障时保护处的短路电流。

4)电流保护装置根据计算得到的短路电流计算电流保护的整定值,对电流保护原整定值进行调整。

3.1 IIDG输出电流分段取值

由第2节,IIDG接入对配电网电流保护的影响程度与IIDG输出功率即输出电流有关,而且IIDG输出电流是故障特性式(5)的变量,在电流保护装置通信获得IIDG当前输出电流的基础上即可进行自适应整定计算。

IIDG输出电流受环境影响而变化,如果对IIDG输出电流进行实时通信,对通信的同步性和通信量要求较高。对此,文中将IIDG输出电流分段取值,当IIDG输出电流区间发生变化时进行通信,且通信数据为IIDG输出电流区间的标识数据,能够解决对通信的同步性和通信量要求较高的问题。以额定功率为3 MW的IIDG为例,最大输出电流幅值为245 A,将IIDG输出电流分为20个区间

$$I_{DG} = \begin{cases} 6.25 \text{ A} & 0 \leq I_{DG} < 12.5 \text{ A} \\ 18.25 \text{ A} & 12.5 \text{ A} \leq I_{DG} < 25.0 \text{ A} \\ \vdots & \vdots \\ 231.25 \text{ A} & 225 \text{ A} \leq I_{DG} < 237.5 \text{ A} \\ 243.75 \text{ A} & 237.5 \text{ A} \leq I_{DG} < 250.0 \text{ A} \end{cases} \quad (19)$$

每个区间用一个数据标识,IIDG并网点采集IIDG输出电流,对IIDG输出电流分段取值,与电流

保护装置通信区间标识,由电流保护装置识别区间即可,分段取值产生的误差最大为5%,在允许接受范围之内。

3.2 电流保护整定值计算

以保护2的整定计算为例,说明文中提出的自适应电流保护方案的整定计算过程。线路 L_2 末端发生相间短路时,即2.1节中 $\alpha=1$,相间短路故障序网络见图10,变量表示与第2节相同。

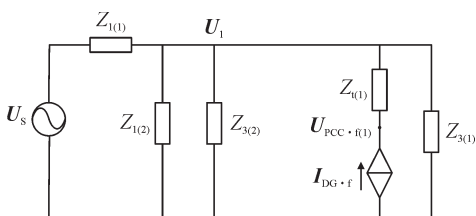


图10 L_2 末端相间短路故障序网络

Fig. 10 Phase-to-phase short-circuit fault sequence network at L_2 terminal

由节点电压法,节点1的电压 U_1 为

$$\frac{U_1 - U_s}{Z_{1(1)}} + \frac{U_1}{Z_{1(2)}} + \frac{U_1}{Z_{3(1)}} + \frac{U_1}{Z_{3(2)}} = I_{DG \cdot f} \quad (20)$$

IIDG并网点正序电压 $U_{PCC \cdot f(1)}$ 为

$$U_{PCC \cdot f(1)} = U_1 + Z_{i(1)} I_{DG \cdot f} \quad (21)$$

以故障前IIDG输出电流 $I_{DG \cdot f}^{(0)}$ 作为迭代计算的初值,代入式(20)、(21),可得并网点正序电压初值 $U_{PCC \cdot f}^{(0)}$,根据IIDG故障电流与并网点正序电压的关系,由式(5)可得IIDG故障电流的修正值 $I_{DG \cdot f}^{(1)}$,将修正值代入式(20)、(21),重复上述过程,直到IIDG故障电流迭代差值满足 $|I_{DG \cdot f}^{(k)} - I_{DG \cdot f}^{(k-1)}| < \varepsilon$,完成迭代,该迭代算法收敛^[28],由得到的IIDG故障电流就可求得流过保护的短路电流。根据以上迭代计算过程,可以得到在当前IIDG输出功率线路末端发生短路故障时保护处的短路电流,从而根据整定原则得到保护需要的整定值,流程图见图11。

通过迭代计算,线路 L_2 末端发生相间短路故障时保护2处的最大短路电流值为 $I_{k \cdot \max}$,根据整定原则,保护2的I段保护整定值 I_{set}^I 为

$$I_{set}^I = K_{rel} I_{k \cdot \max} \quad (22)$$

式(22)中, K_{rel} 为可靠性系数,取1.2~1.3。

同理,可通过迭代计算,得到线路 L_2 的下一段线路即 L_3 末端发生相间短路故障时保护2处的短路电流,计算得到保护2的II段保护整定值。

由以上分析可得,每段线路的保护都可以根据IIDG输出电流计算得到当前IIDG输出功率下每段保护的整定值。

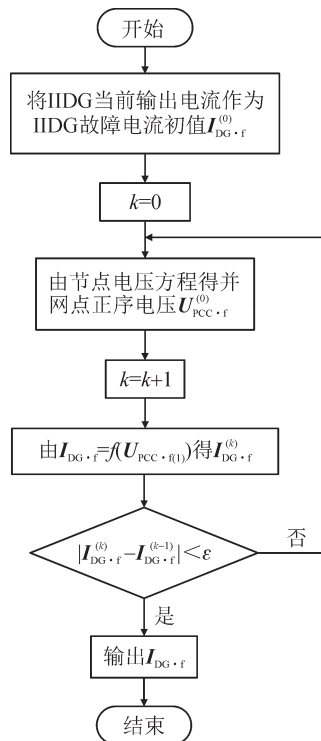


图11 迭代计算流程图

Fig. 11 Iterative calculation flow chart

3.3 保护和IIDG通信的网络安全

根据文中提出的自适应电流保护方案,保护装置和IIDG之间的通信见图12,电流保护的整定值取决于保护装置和IIDG之间的通信,当配电网通信网络受到恶意攻击如注入虚假数据时,电流保护的整定值将被任意更改,危害配电网安全运行。为了应对注入虚假数据等恶意攻击,保护装置和IIDG之间通讯数据应该进行加密处理。

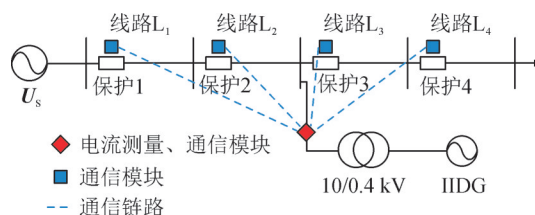


图12 保护装置和IIDG的通信示意

Fig. 12 Communication between protection device and IIDG

4 仿真实验

为验证文中提出方案的正确性,在MATLAB中搭建如图1的仿真模型,参数配置与第2节相同。

4.1 相间短路

分别仿真IIDG输出功率为1、2、3 MW时,线路 L_2 末端发生相间短路故障,保护2处短路电流 $I_{k \cdot \max}$ 实际值和根据文中提出自适应电流保护方案通过IIDG故障前输出电流区间对应值迭代计算得到的

$I_{k1,max}$ 计算值见表1,保护2的I段保护整定值 I_{set}^I 根据 $I_{k1,max}$ 计算值得到,取可靠性系数 K_{set}^I 为1.2。

表1 线路L₂末端相间短路电流计算值仿真值和保护2的I段保护整定值

Table 1 Calculated value and simulation value of phase-to-phase short-circuit current at the end of line L₂ and setting value of protection 2 current quick-break protection

IIDG输出 功率/ MW	IIDG故障 前输出 电流/A	IIDG输出 电流区间 对应值	$I_{k1,max}$ 计算 值/A	$I_{k1,max}$ 实际 值/A	I_{set}^I /A
1	93.2	93.75	1 260.2	1 268.1	1 512.24
2	179.4	181.25	1 220.2	1 219.5	1 464.24
3	260.1	256.25	1 235.7	1 236.7	1 482.84

由表1结果可以看出,根据文中提出的自适应电流保护方案,IIDG上游线路末端发生相间短路故障时保护处短路电流迭代计算值与实际值误差很小。

仿真线路L₂上f₂处发生相间短路故障时,故障点位置 α 分别取0.2、0.5、0.8时保护2处的短路电流,保护2处短路电流和采用文中提出的自适应电流保护的I段保护整定值及传统三段式电流保护的I段保护整定值见表2。

表2 线路L₂上f₂处相间短路故障短路电流与保护2的I段保护整定值

Table 2 Phase-to-phase short-circuit fault short-circuit current at f₂ on line L₂ and setting value of protection 2 current quick-break protection

IIDG输出 功率/ MW	故障点 位置 α	保护2处短路 电流/A	文中自适应 电流保护I 段整定值/A	传统三段式 电流保护I 段整定值/A
1	0.2	1 769.6	1 512.24	1 529.20
	0.5	1 539.3		
	0.8	1 362.7		
2	0.2	1 714.2	1 464.24	
	0.5	1 486.4		
	0.8	1 312.3		
3	0.2	1 728.6	1 482.84	
	0.5	1 502.1		
	0.8	1 328.8		

表2中IIDG输出功率为1 MW时, $\alpha = 0.5$ 即故障发生在线路L₂中间,保护2处短路电流仿真结果见图13,仿真时间0.4 s,故障发生在0.04 s,整定值为采用文中提出的自适应电流保护的整定值。由表2和图13结果可以看出,文中提出的自适应电流保护的I段保护能够可靠动作,保护2的I段保护范围大于50%。

线路L₃末端发生相间短路故障,保护2处短路电流 $I_{k2,max}$ 实际值和 $I_{k2,max}$ 计算值见表3,保护2的II段保护整定值 I_{set}^{II} 根据 $I_{k2,max}$ 计算值得到,取可靠性系

数 K_{set}^{II} 为1.1。

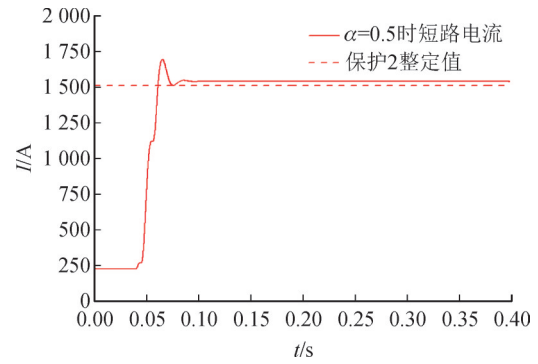


图13 相间短路故障时保护2的短路电流

Fig. 13 Short-circuit current of protection 2 in case of phase-to-phase short-circuit fault

表3 线路L₃末端相间短路电流计算值仿真值和保护2的II段保护整定值及灵敏度

Table 3 Calculated value and simulation value of phase-to-phase short-circuit current at the end of line L₃ and setting value and sensitivity of protection 2 time-limited current quick-break protection

IIDG输出 功率/ MW	IIDG故障 前输出 电流/ A	IIDG输出 电流区 间对 应值	$I_{k2,max}$ 计 算值/A	$I_{k2,max}$ 实 际值/A	I_{set}^{II} /A	灵敏度
1	93.2	93.75	917.7	923.5	1 009.47	1.26
2	179.4	181.25	858.4	864.7	944.24	1.29
3	260.1	256.25	843.4	847.7	927.74	1.33

由表3的结果可以看出,根据文中提出的自适应电流保护方案,IIDG下游线路末端发生相间短路故障时保护处短路电流迭代计算值与实际值误差很小,保护2的II段保护灵敏度大于1.2,根据迭代计算值进行整定的电流保护能够可靠动作。

4.2 三相短路

分别仿真IIDG输出功率为1、2、3 MW时,线路L₄末端发生三相短路故障,保护4处短路电流 $I_{k,max}$ 实际值和根据文中提出自适应电流保护方案通过IIDG故障前输出电流区间对应值迭代计算得到的 $I_{k,max}$ 计算值见表4,保护4的I段保护整定值 I_{set}^I 根据 $I_{k,max}$ 计算值得到,取可靠性系数 K_{rel} 为1.2。

表4 线路L₄末端三相短路电流计算值仿真值和保护4的I段保护整定值

Table 4 Calculated value and simulation value of three-phase short-circuit current at the end of line L₄ and setting value of protection 4 current quick-break protection

IIDG输出 功率/MW	IIDG故障 前输出电 流/A	IIDG输出 电流区间 对应值	$I_{k,max}$ 计算 值/A	$I_{k,max}$ 实际 值/A	I_{set}^I /A
1	93.2	93.75	870.1	866.5	1 044.12
2	179.4	181.25	902.5	898.2	1 083.00
3	260.1	256.25	921.6	919.1	1 105.92

由表4的结果可以看出,线路末端发生三相短路故障时保护处短路电流迭代计算值与实际值误差很小,根据迭代计算值进行整定的电流保护能够可靠动作。

5 结语

针对IIDG接入配电网,仿真分析了相间短路和三相短路故障发生在IIDG上游以及下游的情况,仿真结果表明IIDG接入会使配电网原有的电流保护拒动或者误动,相间短路情况下,故障发生在IIDG上游时会使电流保护发生拒动,故障发生在下游时会使电流保护误动,而三相短路情况下,故障发生在IIDG上游时对电流保护没有影响,故障发生在下游时仍会使电流保护误动;同时,针对性地提出含IIDG配电网的自适应电流保护方案,通过获得IIDG故障前的输出电流并按区间分段,与电流保护装置通信电流区间的标识数据,电流保护装置采用所标识电流区间的典型值进行迭代计算,计算线路末端发生短路故障时流过保护的短路电流,从而进行电流保护的整定计算,实现IIDG输出功率变化时含IIDG配电网的自适应电流保护,并对所提方案通信的网络安全进行讨论,仿真结果表示采用电流区间分段的方法迭代计算误差在允许范围内,具有可靠性,同时又减小了对通信实时性和通信量的要求,而具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 李 晖,刘 栋,姚丹阳.面向碳达峰碳中和目标的中国电力系统发展研判[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6245-6258.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and Carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18):6245-6258.
- [2] 陈 浩,石 辉,邓小亮.光伏大规模发电并网对湖南电网运行影响分析[J].湖南电力,2018,38(6):5-7.
CHEN Hao, SHI Hui, DENG Xiaoliang. Effect of large scale photovoltaic power generation access on Hunan power network[J]. Hunan Electric Power, 2018, 38(6):5-7.
- [3] 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.
- [4] 王 岳,黄永章,王哲凡,等.考虑光伏运行状态切换的MGP并网改进控制策略[J].大电机技术,2025(1):110-116.
WANG Yue, HUANG Yongzhang, WANG Zhefan, et al. An improved DC voltage feedback control strategy for MGP considering
- day and night switching[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(1):110-116.
- [5] 孙文辉,潘 明,朱 宁,等.高比例分布式光伏接入条件下配电网电压越限问题分析与对策[J].变压器,2025,62(9):47-54.
SUN Wenhui, PAN Ming, ZHU Ning, et al. Analysis and countermeasures of overvoltage problems in distribution networks under high-proportion distributed photovoltaic access conditions [J]. Transformer, 2025, 62(9):47-54.
- [6] 范子渊,黄永章,徐佳旺,等.MGP与调相机对光伏场站短路故障稳定性的对比研究[J].大电机技术,2025(6):1-8.
FAN Ziyuan, HUANG Yongzhang, XU Jiawang, et al. Comparative study of MGP and condenser on the short-circuit fault stability of photovoltaic station[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(6):1-8.
- [7] 孙文辉,潘 明,徐梦潇,等.光伏接入条件下影响OLTC“负调压效应”临界点因素的研究[J].变压器,2024,61(1):40-46.
SUN Wenhui, PAN Ming, XU Mengxiao, et al. Research on critical point factors of OLTC negative voltage regulation effect under photovoltaic access condition [J]. Transformer, 2024, 61(1):40-46.
- [8] KAUHANIEMI K, KUMPULAINEN L. Impact of distributed generation on the protection of distribution networks[C]//2004 Eighth IEE International conference on Developments in Power System Protection. Netherlands: IET, 2004:315-318.
- [9] BARAN M E, EL-MARKABY I. Fault analysis on distribution feeders with distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4):1757-1764.
- [10] 分布式电源并网技术要求:GB/T 33593—2017[S], 2017. Technical requirements for grid connection of distributed resources:GB/T 33593—2017[S], 2017.
- [11] 董广凯,黄 嵩,董佳林,等.定功率跟踪控制的光伏并网低电压穿越策略[J].高压电器,2023,59(3):93-98.
DONG Guangkai, HUANG Song, DONG Jialin, et al. Low voltage ride-through strategy of grid-connected photovoltaic generation with constant power tracking control[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3):93-98.
- [12] 尚 璠,邵能灵,刘 琦,等.考虑分布式电源的配电网保护改进方案研究综述[J].电力系统保护与控制,2012,40(24):40-45.
SHANG Jin, TAI Nengling, LIU Qi, et al. New protection method for distribution network with DG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24):40-45.
- [13] 窦小晶,薛 钊,叶日新,等.10 kV分布式电源并网对配电网继电保护的影响分析[J].智慧电力,2019,47(12):117-122.
DOU Xiaojing, XUE Zhao, YE Rixin, et al. Influence of 10 kV DG integration on relay protection in distribution network[J]. Smart Power, 2019, 47(12):117-122.
- [14] 韩博文,王 钢,李海锋,等.含逆转型分布式电源配电网的新型纵联保护方案[J].高电压技术,2017,43(10):3453-3462.
HAN Bowen, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Novel pilot protection scheme for distribution networks with inverter-interfaced distributed generators[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10):3453-3462.
- [15] 徐 萌,邹贵彬,高 磊,等.含逆转型分布式电源的配电网正序阻抗纵联保护[J].电力系统自动化,2017,41(12):93-99.

- XU Meng, ZOU Guibin, GAO Lei, et al. Pilot protection of positive sequence impedance for distribution network with inverter-based distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12):93-99.
- [16] 赵凤贤, 孟镇, 李永勤, 等. 基于故障分量的主动配电网纵联保护原理[J]. 高电压技术, 2019, 45(10):3092-3100.
ZHAO Fengxian, MENG Zhen, LI Yongqin, et al. Pilot protection scheme for active distribution network based on fault components [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10):3092-3100.
- [17] 周成瀚, 邹贵彬, 杜肖功, 等. 基于正序电流故障分量的有源配电网纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7):2102-2112.
ZHOU Chenghan, ZOU Guibin, DU Xiaogong, et al. A pilot protection method based on positive sequence fault component current for active distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7):2102-2112.
- [18] 梁莹玉, 卢正杰. 基于补偿系数的有源配电网自适应电流差动保护[J]. 电网技术, 2022, 46(6):2268-2275.
LIANG Yingyu, LU Zhengjie. Adaptive differential protection principle based on compensation coefficient for active distribution network[J]. Power System Technology, 2022, 46(6):2268-2275.
- [19] 贾健飞, 李博通, 孔祥平, 等. 计及逆变型分布式电源输出特性的配电网自适应电流保护研究[J]. 高压电器, 2019, 55(2):149-155.
JIA Jianfei, LI Botong, KONG Xiangping, et al. Research on adaptive current protection for distribution network considering the output characteristics of inverter-interfaced distributed generator [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2):149-155.
- [20] 曾德辉, 王钢, 郭敬梅, 等. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12):86-92.
ZENG Dehui, WANG Gang, GUO Jingmei, et al. Adaptive current protection scheme for distribution network with inverter-interfaced distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12):86-92.
- [21] 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电流保护[J]. 电工技术学报, 2022, 37(s1):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.
- [22] 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.
- [23] GUO Xiaoqiang, WU Weiyang, CHEN Zhe. Multiple - complex coefficient - filter - based phase - locked loop and synchronization technique for three-phase grid-interfaced converters in distributed utility networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4):1194-1204.
- [24] NIKKHAJOEI H, LASSETER R H. Microgrid protection[C]//2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. USA: IEEE, 2007:1-6.
- [25] TIMBUS A V, RODRIGUEZ P, TEODORESCU R, et al. Control strategies for distributed power generation systems operating on faulty grid[C]//2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Singapore: IEEE, 2006:1601-1607.
- [26] 徐可寒, 张哲, 刘慧媛, 等. 光伏电源故障特性研究及影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2):359-371.
XU Kehan, ZHANG Zhe, LIU Huiyuan, et al. Study on fault characteristics and its related impact factors of photovoltaic generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2):359-371.
- [27] 曹辰, 路敦林, 王雪, 等. 变压器温度和机械振动特性的仿真与分析[J]. 变压器, 2024, 61(1):17-23.
CAO Chen, LU Dunlin, WANG Xue, et al. Simulation and analysis of temperature mechanical vibration characteristics of transformers [J]. Transformer, 2024, 61(1):17-23.
- [28] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含PQ控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014(4):555-561.
PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014(4):555-561.
- 彭思敏(1995—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事配电网设备状态评价研究(E-mail: 240639880@qq.com)。
- 李允博(1999—), 男, 硕士, 主要从事有源配电网故障特性和继电保护研究(通信作者)(E-mail: liyunbo@stu.xjtu.edu.cn)。
- 康童(1987—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事智能配电网及新型配电系统相关技术研究(E-mail: 649360483@qq.com)。
- 万代(1985—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事智能配电网及新型配电系统相关技术研究(E-mail: 280241509@qq.com)。
- 杨兰均(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 硕士, 主要从事新型电力系统和脉冲功率技术研究(E-mail: yanglj@mail.xjtu.edu.cn)。