

基于改进粒子群算法的主动配电网电流保护策略

于 群¹,葛浩敬²,王 彬¹,刘浩璇¹,李佳衡³

(1. 山东科技大学 电气与自动化工程学院,山东 青岛 266590;

2. 国网宿州市城郊供电公司,安徽 宿州 234000;3. 莫纳什大学 工程学院,维多利亚州 墨尔本 VIC 3145)

摘要:主动配电网中接入大量逆变型分布式电源(IIDG),改变了配电网结构。随着渗透率的逐渐增大,易导致固有电流保护误动、拒动。本研究在考虑 IIDG 低电压穿越及其故障电流特性基础上,提出一种含 IIDG 的主动配电网故障等效模型及求解方法。计及 IIDG 故障电流的非线性和压控特性,采用改进粒子群算法对故障模型迭代求解;给出考虑 IIDG 接入后的电流保护整定方案。通过 MATLAB/Simulink 建立含 IIDG 的主动配电系统,验证了故障等效模型的正确性和改进求解算法的有效性,以及考虑 IIDG 接入后电流保护整定方案的合理性。

关键词:主动配电网;逆变型分布式电源;继电保护;故障模型;粒子群算法

中图分类号:TM711

文献标志码:A

Current protection strategy of active distribution network based on improved particle swarm optimization algorithm

YU Qun¹, GE Haojing², WANG Bin¹, LIU Haoxuan¹, LI Jiaheng³

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. State Grid Suzhou Suburban Electric Power Supply Company, Suzhou 234000, China;

3. Faculty of Engineering, Monash University, Melbourne, VIC 3145, Australia)

Abstract: The connection of large-scale inverter interfaced distributed generators (IIDG) to the active distribution network leads to the change of the distribution network structure and tends to produce wrong action or no action of the original current protection device as the permeability increases. Considering IIDG low-voltage ride through and fault current characteristics, a fault equivalent model and solution method of the active distribution network with IIDG were proposed. Considering the nonlinear and voltage-control characteristics of IIDG fault current, particle swarm optimization was used to solve the fault model iteratively. The current protection setting scheme considering IIDG access was presented. An active distribution system with IIDG was established by using MATLAB/Simulink to verify the correctness of the fault equivalent model and the effectiveness of the improved solution algorithm, as well as the rationality of the current protection setting scheme considering IIDG access.

Key words: active distribution network; inverter interfaced distributed generator; relay protection; fault model; particle swarm optimization

主动配电网(active distribution network, ADN)具有较强的自我控制与管理技术,通过对内部可控资源的合理管控,可实现清洁能源的高水平消纳,是未来配电网发展的明确方向^[1]。在 ADN 中,接入逆变型分布式电源(inverter interfaced distributed generator, IIDG)的容量及并网位置直接改变了原系统的供电结构,对电能流向和水平产生影响。在系统发生故障时,短路电流易发生变化,可能引起原有保护的误动作、拒

收稿日期:2024-06-05

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(5100-202155482A-0-5-ZN)

作者简介:于 群(1970—),男,山东淄博人,教授,博士生导师,主要从事电力系统安全分析、继电保护与控制工作。

E-mail:yuqun_70@163.com

动作。因此,传统的阶段式电流保护在主动配电网中受到一定制约^[2-4]。

文献[5]在优先确保继电保护装置可靠动作的前提下,分析了分布式电源(distributed generator, DG)的最大准入容量,表明受固有保护装置正确动作的影响配电系统对 DG 消纳水平较低;文献[6]通过在 DG 出口与系统连接点之间装设故障限流装置,降低了 DG 向系统提供的故障电流,但限流器难以适应电力电子器件的快速反应能力;文献[7]提供了一种利用母线和出线之间的故障分量电流相位确定故障方向的方法,但要求配电系统至少有三条出线,适用范围较小;文献[8]通过分析短路电流与光伏电源输出功率的关系,对传统电流保护整定方案进行修改,提高传统电流保护对光伏电源接入的适应性,但未考虑光伏电源低电压穿越运行(low voltage ride through, LVRT)时的情况;文献[9-11]利用 IIDG 的高可控性向系统注入附加谐波电流,构建了新型保护判据,实现了故障线路有选择性地切除,但对 IIDG 的控制方式改动较大,同时需要采用高性能的通讯装置,难以应用到现有配电网络;文献[12]将系统故障序分量和参考相量的相位进行对比,构建了一种方向判据,可根据判据准确定位故障线路,并由此实现有选择性地切除故障线路,但该判据忽略了分布式电源故障时的输出特性;文献[13]利用主动配电网的故障分量特征,提出一种基于正序故障分量的纵联保护方法,但需要借助通信网络,对保护配置改动较大,且对计算速度要求较高;文献[14-15]将差动保护应用到有源配电网,理论上具有绝对的选择性,但需要对保护装置进行大规模的改造升级,经济性较差;文献[16-18]利用配电监控单元实时掌握原系统和 IIDG 运行情况,并根据分布式电源的故障模型在线调整电流保护的定值,但对数据传输以及计算速度的要求较高。

针对上述情况,本研究首先根据 IIDG 的 LVRT 控制流程,得到 IIDG 在系统故障时的输出特性,进而得出含 IIDG 主动配电网的故障等效模型;然后结合 IIDG 输出短路电流的非线性和压控特性,采用改进的粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法对故障模型进行迭代求解,并给出考虑 IIDG 并网后的电流保护整定方案;最后,通过 MATLAB/Simulink 建立含 IIDG 的主动配电系统,仿真验证故障等效模型的正确性和求解算法的准确性,以及考虑 IIDG 接入后电流保护整定方案的有效性,实现含 IIDG 的主动配电网故障参数精确计算。

1 IIDG 输出特性和 LVRT 控制策略

以基于 PQ 控制的光伏电源为例,研究 IIDG 的输出特性和 LVRT 控制策略。IIDG 并网等效模型如图 1 所示。图 1 中, PV 表示光伏板电源, U_{dc} 为 IIDG 直流侧母线电压; C 为电容; R、L 分别为 IIDG 交流侧滤波装置的等效电阻和电感; U_{abc} 、 I_{abc} 分别为 IIDG 交流侧三相电压和电流; E_A 、 E_B 、 E_C 分别为 IIDG 并网处系统三相电压。

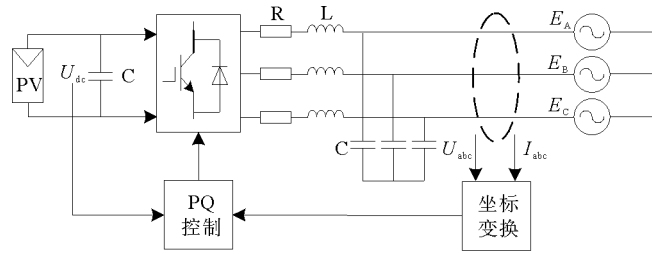


图 1 IIDG 并网等效示意图

Fig. 1 Equivalent structure diagram of IIDG grid-connected

使用 dq 旋转坐标系,并将 q 轴电压分量设置为 0 时,可以得到 IIDG 的输出功率:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) = \frac{3}{2}u_d i_d, \\ Q = \frac{3}{2}(u_d i_q - u_q i_d) = -\frac{3}{2}u_d i_q. \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 、 Q 分别为 IIDG 向系统传输的有功功率、无功功率; u_d 、 u_q 为 IIDG 的 d 、 q 轴电压; i_d 、 i_q 分别为 IIDG 的 d 、 q 轴电流。

根据国标对无功电流支撑的要求^[19],以及并网逆变器对最大输出电流的限制,可得到系统故障时 IIDG 进入 LVRT 后的输出方程:

$$I_{\text{IIDG}} = \begin{cases} i_q = \min(K \times (0.9 - \frac{U_{\text{PCC}}}{U_N}) I_N, I_{\text{max}}), \\ i_d = \min(i_{d_ref}, \sqrt{(I_{\text{max}}^2 - i_q^2)}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_{PCC} 为 IIDG 并网处实际电压; K 为无功电流补偿系数, 本研究取 2; U_N 、 I_N 分别为 IIDG 的额定电压、电流; I_{max} 为 IIDG 允许的最大输出电流有效值, 本研究取 $1.5 I_N$; i_{d_ref} 为 d 轴电流参考值。

2 主动配电网故障等效模型及求解方法

2.1 故障等效模型

以图 2 含 IIDG 的典型主动配电系统为例, 分析 IIDG 接入后不同位置发生故障时的等效模型。图 2 中, 1~7 为电路保护, f1~f4 处不同位置发生对称短路时具有相似的故障模型, 均可简化为图 3 所示的电路结构。图 3 中, E_s 为系统电源; Z_s 为系统阻抗; I_{k1} 为 E_s 提供的短路电流; I_{k2} 为 IIDG 提供的短路电流; I_f 为故障点短路电流; $Z_1 \sim Z_3$ 为相应线路的阻抗, 受故障点变化而变化。

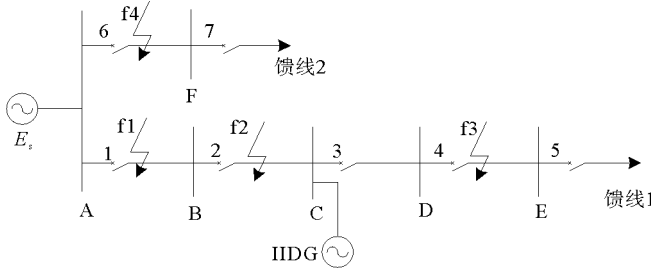


图 2 IIDG 接入主动配电网示意图

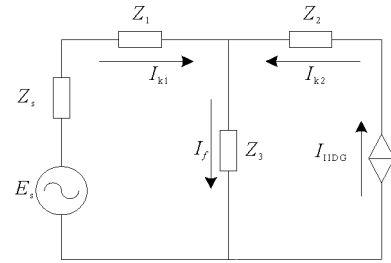


图 3 主动配电网短路故障等效电路图

Fig. 2 Schematic diagram of IIDG connecting to active distribution network Fig. 3 Fault equivalent circuit diagram of ADN
假设 f3 处发生三相短路故障, 通过母线 A、C 处的节点方程可以得:

$$\begin{cases} (\frac{1}{Z_s} + \frac{1}{Z_{AL2} + Z_{load2}} + \frac{1}{Z_{AC}}) U_A - \frac{1}{Z_{AC}} U_C = \frac{E_s}{Z_s}, \\ -\frac{1}{Z_{AC}} U_A + (\frac{1}{Z_{AC}} + \frac{1}{Z_{CD} + \alpha Z_{DE}}) U_C = I_{\text{IIDG}}, \\ I_{\text{IIDG}} = f(U_{\text{PCC}}). \end{cases} \quad (3)$$

式中: Z_{AL2} 为母线 A 到馈线 2 负荷的线路阻抗; Z_{load1} 为馈线 1 的负载等效阻抗; Z_{AC} 为线路 AC 阻抗; Z_{CD} 为线路 CD 阻抗; Z_{DE} 为线路 DE 阻抗; U_A 、 U_C 分别为母线 A、C 电压; α 为故障距离百分数, 即故障点距线路首端长度与线路全长之比; $f(\cdot)$ 为 IIDG 在系统故障期间输出的短路电流与其端口电压的映射关系, 如式 (2) 所示。通过求解式 (3), 可得到 f3 处发生三相短路故障时系统的故障参数。

当 f3 处发生两相短路时, 受正序电压控制策略的影响, IIDG 只输出三相对称的故障电流, 即 IIDG 不应出现在负序与零序网络中^[20-21]。此时, 系统的正序与负序网络图分别如图 4(a) 与图 4(b) 所示。图 4 中, $U_{f(1)}$ 为 f3 处故障正序电压, $U_{f(2)}$ 为 f3 处故障负序电压, Z_{EL1} 为母线 E 到馈线 1 负荷的线路阻抗, Z_{load2} 为馈线 2 的负载等效阻抗。

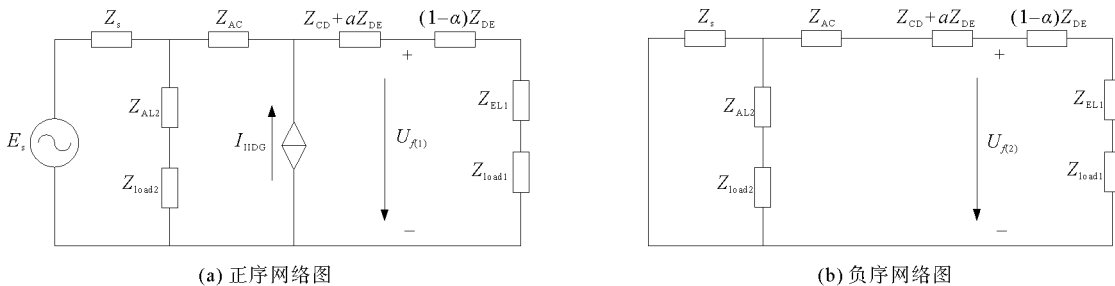


图 4 主动配电网两相短路时故障序网图

Fig. 4 Fault sequence diagrams of ADN when two-phase fault occurs

与式(3)类似,通过求解复合序网图的节点电压方程,可得到 f3 处发生两相短路时的系统故障参数。对于含有多个 IIDG 的主动配电网,其节点求解方程同式(3)类似,用矩阵表示:

$$\begin{cases} \mathbf{YU} = \mathbf{AI}_{\text{IIDG}} + \mathbf{I}, \\ I_{\text{IIDG},i} = f(U_{\text{PCC},i}). \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{U}$ 为故障等效电路节点电压矩阵; $\mathbf{Y}$ 为主动配电网故障等效电路的节点导纳矩阵; $\mathbf{A}$ 为 IIDG 与故障等效电路节点之间的关联矩阵; $\mathbf{I}_{\text{IIDG}}$ 为 IIDG 输出电流矩阵; $\mathbf{I}$ 为 E_s 向系统提供的故障电流矩阵。

对式(4)求解时,需考虑所有 IIDG 的非线性输出特性。各母线电压在系统故障期间差异较大,常用的数学求解方法对迭代初始值敏感,如初始值选择不当会难以收敛。PSO 算法是一种通过逐次迭代求解问题的优化算法,待求解的各维度在迭代开始时均被设置成一群自由粒子(随机解),因此求解过程中对解向量的初始值不敏感^[22]。同其他算法相比,PSO 算法具有概念清晰、编程简单、参数较少、收敛快和通用性强等优点,且不依赖于问题信息,适合于实值型处理,对初始值和内存要求低,能够处理高维度问题,对高维空间优化问题具有较好的适应性。尽管 PSO 算法存在早熟收敛、迭代过程受参数影响等缺点,但通过改进或优化,在神经网络训练、函数优化等领域仍被广泛应用。因此,本研究选用 PSO 算法迭代求解故障等效模型。

2.2 基于改进 PSO 算法的故障模型求解方法

选取式(4)中每个方程的绝对值之和作为 PSO 算法的适应度函数 $h(x_i)$ 。当 $h(x_i)$ 小于设定的收敛精度 ϵ 时,便可认为此时的解为方程组的近似解。同时,为了克服算法早熟问题、增强其寻优能力,本研究从以下几个方面对 PSO 算法进行改进。

1) 采用 Circle 映射代替随机数生成器^[23],生成分布更加均匀、多样的初始种群。其计算式为:

$$x_{i+1} = \text{mod}(x_i + 0.2 - \frac{0.5}{2\pi} \sin(2\pi x_i), 1). \quad (5)$$

式中: x_i, x_{i+1} 分别为第 i 和 $i+1$ 个序列数; $\text{mod}(a, b)$ 表示 a 对 b 进行取余运算。

2) 采用非线性递减的惯性权重 w ,以增加在求解过程前期的全局和后期的局部搜索能力,

$$w = (w_{\max} - w_{\min} - d_1) e^{\frac{1}{(1+d_2 \times k/K_{\max})}}. \quad (6)$$

式中: $w_{\max}, w_{\min}$ 分别为惯性权重的最大值与最小值; d_1, d_2 为影响权重递减快慢的常数; k 为当前迭代次数; $K_{\max}$ 为最大迭代次数。

3) 使用余弦函数分别构造非线性的异步学习因子^[24]。为加强局部搜索能力,在求解前期将个体学习因子 c_1 取较大值,群体学习因子 c_2 取较小值,在迭代后期采用较小的 c_1 和较大的 c_2 。

$$\begin{cases} c_1 = 2 \sqrt{\left| \cos\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{k}{K_{\max}}\right) \right|}, \\ c_2 = 2 \sqrt{1 - \left| \cos\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{k}{K_{\max}}\right) \right|}. \end{cases} \quad (7)$$

4) 自适应速度与位置更新策略。利用适应度值区别粒子在下次迭代中的速度变化方向,当本次寻优结果优于上一次时,依靠粒子自身惯性运动,反之,按照基础粒子群算法更新速度和位置。

$$v_{id}^{k+1} = \begin{cases} wv_{id}^k, & h(x_i^k) < h(x_i^{k-1}); \\ wv_{id}^k + c_1 r_1 (p_{\text{best},id} - x_{id}^k) + c_2 r_2 (g_{\text{best},d} - x_{id}^k), & h(x_i^k) \geq h(x_i^{k-1}). \end{cases} \quad (8)$$

式中: $h(x_i)$ 为粒子 x_i 的适应度值; v_{id}^k, v_{id}^{k+1} 分别为第 k 代和第 $k+1$ 代种群粒子 i 的第 d 维速度; x_{id}^k 为第 k 代种群粒子 i 的第 d 维位置; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 区间的随机数,增加搜索的随机性; c_1, c_2 分别为个体和群体学习因子; $p_{\text{best},id}$ 为粒子 i 迭代中最好的 d 维位置; $g_{\text{best},d}$ 为整个种群迭代中最好的 d 维位置。

引入自适应参数 η 调整粒子的位置更新算式,以保证粒子前期寻优的快速性和优化后期的不发散性。

$$\begin{cases} x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + \eta^k v_{id}^k, \\ \eta^k = \frac{(\eta_{\max} - \eta_{\min})}{1 + e^{\frac{\partial(k - K_{\max}/2)}{\partial(k - K_{\max}/2)}}} + \eta_{\min}. \end{cases} \quad (9)$$

式中: η^k 为第 k 次位置调整参数; $\eta_{\max}$ 、 $\eta_{\min}$ 分别表示 η 取最大值与最小值,一般取 $\eta_{\max} \in [1.0, 1.8]$, $\eta_{\min} \in [0.4, 0.8]$; ∂ 为影响 η 变化快慢的参数,一般取 $\partial \in [0.005, 0.015]^{[25]}$ 。

3 考虑 IIDG 接入后的电流保护整定方案

以图 2 中电路保护 2、3 为例,通过式(4)求解可得母线 D 发生三相短路时的短路参数。其中,母线 C 电压为:

$$U_C = \frac{E_s + I_{\text{IIDG}}(Z_s + Z_{AB} + Z_{BC})}{Z_s + Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CD}} Z_{CD}。 \quad (10)$$

电路保护 3 的短路电流为:

$$I_{\text{CB3}}^{(3)} = \frac{U_C}{Z_{CD}} = \frac{E_s + I_{\text{IIDG}}(Z_s + Z_{AB} + Z_{BC})}{Z_s + Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CD}}。 \quad (11)$$

电路保护 2 的短路电流为:

$$I_{\text{CB2}}^{(3)} = \frac{E_s - U_C}{Z_s + Z_{AC}} = \frac{E_s - I_{\text{IIDG}}Z_{CD}}{Z_s + Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CD}}。 \quad (12)$$

由式(11)、式(12)可以看出,母线 D 发生故障时,受 IIDG 输出短路电流 I_{IIDG} 影响,保护 3 的短路电流 $I_{\text{CB3}}^{(3)}$ 增大,易导致保护 3 失去选择性, $I_{\text{CB2}}^{(3)}$ 相应减小,使保护 2 的灵敏度变低。

同理,相邻馈线 F 母线发生三相短路时,流过电路保护 6 的短路电流为:

$$I_{\text{CB6}}^{(3)} = \frac{U_A}{Z_{AF}} = \frac{E_s}{Z_{AF} + Z_s} + \frac{I_{\text{IIDG}}Z_s}{Z_{AF} + Z_s}。 \quad (13)$$

由式(13)可以看出,母线 F 发生故障时,受 IIDG 输出短路电流 I_{IIDG} 影响,流过保护 6 的短路电流也会变大,但受 IIDG“弱馈”特性影响, $I_{\text{CB6}}^{(3)}$ 增幅不大,固有保护策略一般仍能满足要求。

根据上述故障特征,本研究提出以下计及 IIDG 输出特性的电流保护整定方案。

1) 对于电路保护 3 的电流保护 I 段,其定值按照躲过 IIDG 接入后的母线 D 发生三相短路时,流过其自身的最大短路电流整定:

$$I_{\text{set},3}^{\text{I}} = K_{\text{rel}}^{\text{I}} I_{f,D,\max}^{(3)} \quad (14)$$

式中: $I_{\text{set},3}^{\text{I}}$ 为电路保护 3 的 I 段整定值; $K_{\text{rel}}^{\text{I}}$ 为保护 I 段的可靠系数,取 $1.2^{[26]}$; $I_{f,D,\max}^{(3)}$ 为母线 D 发生故障时的最大短路电流。

2) 对于电路保护 3 的电流保护 II 段,应优先与保护 4 的电流 I 段配合进行整定,若灵敏度不满足要求,可与电路保护 4 的电流 II 段配合进行整定:

$$\begin{cases} I_{\text{set},3}^{\text{II}} = K_{\text{rel}}^{\text{II}} I_{\text{set},4}^{\text{I}}, \\ I_{\text{set},3}^{\text{II}} = K_{\text{rel}}^{\text{II}} I_{\text{set},4}^{\text{II}}。 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $I_{\text{set},3}^{\text{II}}$ 、 $I_{\text{set},4}^{\text{I}}$ 和 $I_{\text{set},4}^{\text{II}}$ 分别为电路保护 3 的 II 段、电路保护 4 的 I 段和 II 段电流整定值; $K_{\text{rel}}^{\text{II}}$ 为 II 段电路保护的可靠系数,取 $1.1^{[26]}$ 。

3) 对于电路保护 2 的电流 II 段应与保护 3 的电流 I 段进行配合,并考虑 IIDG 输出短路电流的影响,

$$\begin{cases} I_{\text{set},2}^{\text{II}} = \frac{K_{\text{rel}}^{\text{II}}}{K_{\text{br}}} I_{\text{set},3}^{\text{I}}, \\ K_{\text{br}} = \frac{I_{\text{set},3}^{\text{I}}}{I_{f,\text{CB2}}^{(3)}}。 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $I_{\text{set},2}^{\text{II}}$ 为电路保护 2 的 II 段电流整定值; K_{br} 为考虑 IIDG 影响的分支系数,为了保证电路保护的选择性,应取可能存在的最小值 1; $I_{f,\text{CB2}}^{(3)}$ 为整定配合点故障时保护 2 的故障电流。

4) 对于电路保护 3,其电流 III 段保护仍按躲过其自身的最大负荷电流整定:

$$I_{\text{set},3}^{\text{III}} = \frac{K_{\text{rel}}^{\text{III}} K_{\text{MS}}}{K_{\text{re}}} I_{\text{L3,max}} \circ \quad (17)$$

式中: $I_{\text{set},3}^{\text{III}}$ 表示电路保护 3 的 III 段电流整定值; K_{rel} 为相应的可靠系数, 本研究取 1.15; K_{MS} 为考虑电机负载启动时的系数, 与系统实际负荷结构相关, 本研究取 1.5; K_{re} 为继电器返回系数, 取 0.95; $I_{\text{L},3,\text{max}}$ 表示电路保护 3 的最大负荷电流。

对于图 2 中的保护 1、4、5、6 和 7,其阶段式电流保护整定原则和保护 3 相同,不再叙述。基于改进粒子群搜索算法的主动配电网故障模型求解及整定方案流程如图 5 所示。

4 案例分析

4.1 故障模型正确性与求解方法准确性

为验证上述所提故障等效模型和电流保护方案的正确性,在 Matlab/Simulink 中建立了含 IIDG 的主动配电系统,其结构如图 6 所示。其中,CB1~CB9 为对应线路首段保护装置,IIDG1 与 IIDG3 的额定容均为 1 MVA。该系统额定电压为 10.5 kV,系统最小等值阻抗 $j0.4 \Omega$,最大等值阻抗 $j0.7 \Omega$,母线 A~H、馈线 1 和馈线 2 负荷均为 0.5 MVA,功率因数 0.85。各段线路均使用同规格的 LGJ-95 型架空线路,每千米阻抗 $Z=0.343+j0.35 \Omega$ 。所使用的粒子群算法的粒子数为 50,最大迭代次数为 100,允许收敛精度 $\epsilon=10^{-5}$ 。

IIDG 未接入时,各段线路参数与 CB1~CB9 的整定值如表 1 所示。其中,CB5 与 CB9 直接与负载相连,仅配置电流Ⅲ段保护,CB4 与 CB8 因靠近线路末端且下游保护未配置电流Ⅰ段或Ⅱ段,其电流Ⅱ段保护按最小运行方式下 1.3 倍灵敏度整定;EL1、EH2 分别为母线 E 到馈线 1 和母线 H 到馈线 2 的负荷线路。

为验证本研究提出的主动配电网故障等效模型及求解方法的准确性,以图 6 中母线 E 发生三相金属性短路,IIDG2 的额定容量为 2 MVA 为例,将 PSO 算法求解结果与仿真结果进行对比验证。此时,IIDG2 输出的电压、电流及 d 、 q 轴电流波形如图 7 所示。

由图 7 可知,系统在 0.15 s 发生故障后,IIDG2 的 d 、 q 轴电流按照 LVRT 控制流程发生变化,0.45 s 故障切除后,又恢复到初始状态。此时,三相短路参数的仿真结果与 PSO 计算结果如表 2 所示。表 2 中, I_{fa} 为故障点 A 相电流; $U_{fa, \text{IIDG1}}$ 、 $U_{fa, \text{IIDG2}}$ 、 $U_{fa, \text{IIDG3}}$ 分别为 IIDG1~IIDG3 的 A 相故障电压; $I_{fa, \text{IIDG1}}$ 、 $I_{fa, \text{IIDG2}}$ 、 $I_{fa, \text{IIDG3}}$ 分别为 IIDG1~IIDG3 的 A 相故障电流; $i_{d, \text{IIDG1}}$ 、 $i_{d, \text{IIDG2}}$ 、 $i_{d, \text{IIDG3}}$ 分别为 IIDG1~IIDG3 的 d 轴电流; $i_{q, \text{IIDG1}}$ 、 $i_{q, \text{IIDG2}}$ 、 $i_{q, \text{IIDG3}}$ 分别为 IIDG1~IIDG3 的 q 轴电流。

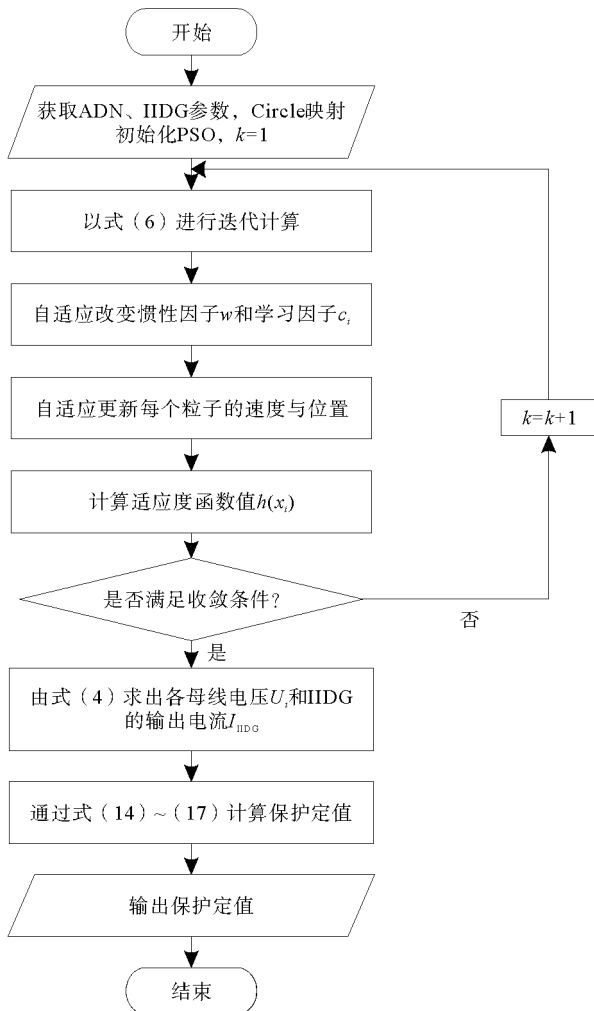


图 5 主动配电网故障模型求解及保护整定方案流程

Fig. 5 Fault model solving and protection setting scheme flow of ADN

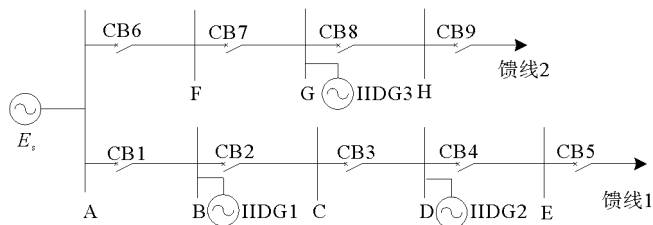


图 6 含 IIDG 的主动配电系统

Fig. 6 Active distribution system with IIDG

表 1 IIDG 未接入时系统参数与电路保护配置情况

Table 1 System parameters and circuit protection configurations when IIDG access is not considered

线路名称	长度/km	阻抗/ Ω	保护编号	$I_{\text{set}}^{\text{I}}/\text{kA}$	$I_{\text{set}}^{\text{II}}/\text{kA}$	$I_{\text{set}}^{\text{III}}/\text{kA}$
AB	2	$0.686 + \text{j}0.700$	CB1	5.612	0.577	0.262
BC	3	$1.029 + \text{j}1.050$	CB2	2.645	0.524	0.210
CD	5	$1.715 + \text{j}1.750$	CB3	1.400	0.476	0.157
DE	8	$2.744 + \text{j}2.800$	CB4	0.798	0.433	0.105
EL1	2	$0.686 + \text{j}0.700$	CB5	—	—	0.052
AF	2	$0.686 + \text{j}0.700$	CB6	5.612	0.826	0.210
FG	3	$1.029 + \text{j}1.050$	CB7	2.645	0.751	0.157
GH	6	$2.058 + \text{j}2.100$	CB8	1.280	0.683	0.105
HL2	2	$0.686 + \text{j}0.700$	CB9	—	—	0.052

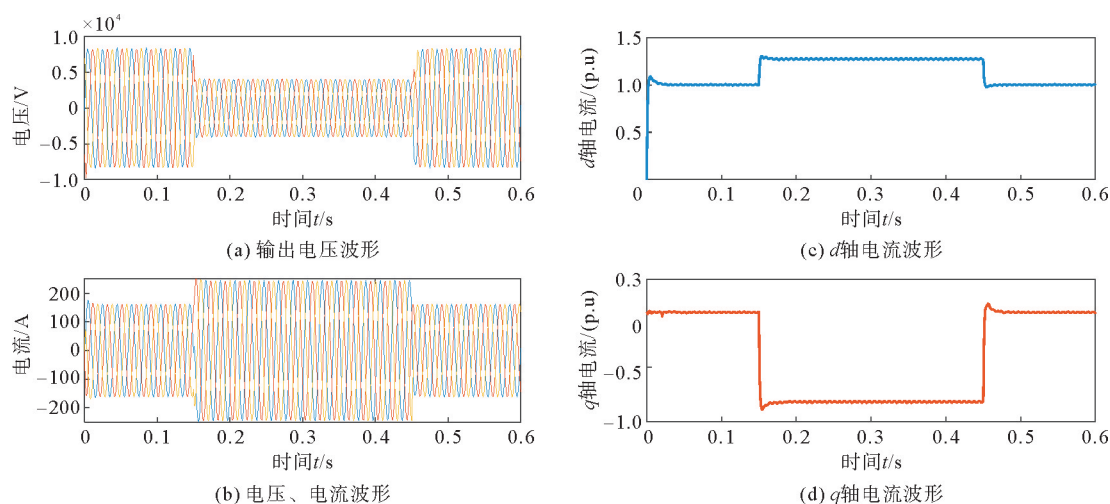
图 7 IIDG2 输出电压、电流和 d 、 q 电流波形Fig. 7 IIDG2 voltage, current and d 、 q waveforms

表 2 三相短路故障仿真结果与 PSO 计算结果

Table 2 Simulation results and PSO calculation results of three-phase short-circuit fault

故障参数	仿真值(相位)	PSO 计算值(相位)	幅值相对误差/%	相位相对误差/%
I_{fa}/kA	$0.728(\angle -48.20^\circ)$	$0.731(\angle -49.17^\circ)$	0.41	2.01
$U_{fa, \text{IIDG1}}/\text{kV}$	$5.130(\angle -2.40^\circ)$	$5.112(\angle -2.31^\circ)$	0.35	3.89
$I_{fa, \text{IIDG1}}/\text{kA}$	$0.065(\angle -3.61^\circ)$	$0.066(\angle -3.49^\circ)$	0.57	3.43
$i_{d, \text{IIDG1}}/\text{A}$	64.985	65.967	1.51	—
$i_{q, \text{IIDG1}}/\text{A}$	-1.373	-1.359	1.03	—
$U_{fa, \text{IIDG2}}/\text{kV}$	$2.845(\angle 1.10^\circ)$	$2.853(\angle 1.13^\circ)$	0.28	2.73
$I_{fa, \text{IIDG2}}/\text{kA}$	$0.174(\angle -33.70^\circ)$	$0.173(\angle -34.19^\circ)$	0.58	1.45
$i_{d, \text{IIDG2}}/\text{A}$	146.896	145.473	0.97	—
$i_{q, \text{IIDG2}}/\text{A}$	-94.747	-93.781	1.03	—
$U_{fa, \text{IIDG3}}/\text{kV}$	$5.580(\angle -2.51^\circ)$	$5.557(\angle -2.46^\circ)$	0.42	2.03
$I_{fa, \text{IIDG3}}/\text{kA}$	$0.059(\angle -2.51^\circ)$	$0.060(\angle -2.46^\circ)$	1.69	2.03
$i_{d, \text{IIDG3}}/\text{A}$	59.491	60.497	1.69	—
$i_{q, \text{IIDG3}}/\text{A}$	0	0	0	—

从表 2 可以看出,使用本研究提出的故障模型和求解算法计算的短路参数与 Simulink 仿真结果基本一致。短路电流相对误差为 0.41%,相位相对误差 2.01%;IIDG2 端口电压相对误差为 0.28%,相位相对误差因数数值较小而略大,但其绝对误差仅为 0.03°;IIDG2 输出的故障电流相对误差为 0.58%,相位相对误差

1.45%; d 、 q 轴电流误差分别为 0.97% 和 1.03%; IIDG1 与 IIDG3 的故障数据误差与 IIDG2 类似,幅值误差在 1% 左右,相位误差因数据较小而略大,但绝对误差均很小。

同理,在母线 E 设置 BC 两相金属性短路进行仿真验证,IIDG2 输出的电压、电流及 d 、 q 轴电流波形如图 8 所示。

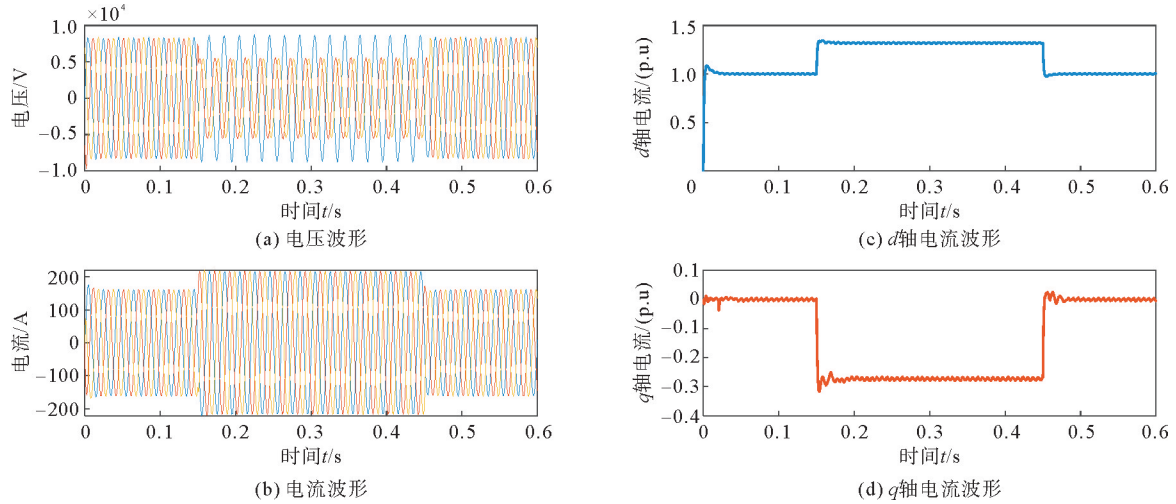


图 8 IIDG2 输出电压、电流和 d 、 q 电流波形

Fig. 8 IIDG2 voltage, current and d 、 q waveforms

由图 8 可知,系统在 0.15 s 发生 BC 两相短路后,三相电压明显不对称,但 IIDG2 受正序电压控制影响,仍然输出三相对称的故障电流,且 d 、 q 轴电流按照 LVRT 控制流程发生变化。此时仿真结果与 PSO 计算结果对比如表 3 所示。

表 3 两相短路故障仿真结果与 PSO 计算结果

Table 3 Simulation results and PSO calculation results of two-phase short-circuit fault

故障参数	仿真值(相位)	PSO 计算值(相位)	幅值相对误差/%	相位相对误差/%
I_{fb}/kA	0.614($\angle -138.40^\circ$)	0.619($\angle -140.14^\circ$)	0.87	1.26
$U_{fa(1), \text{IIDG1}}/\text{kV}$	5.538($\angle -0.51^\circ$)	5.592($\angle -0.53^\circ$)	0.98	3.92
$I_{fa, \text{IIDG1}}/\text{kA}$	0.061($\angle -0.51^\circ$)	0.062($\angle -0.53^\circ$)	1.65	3.92
$i_{d, \text{IIDG1}}/\text{A}$	60.537	61.529	1.65	—
$i_{q, \text{IIDG1}}/\text{A}$	0	0	0.00	—
$U_{fa(1), \text{IIDG2}}/\text{kV}$	4.423($\angle 2.75^\circ$)	4.456($\angle 2.81^\circ$)	0.75	2.80
$I_{fa, \text{IIDG2}}/\text{kA}$	0.154($\angle -8.93^\circ$)	0.157($\angle -9.31^\circ$)	1.95	4.26
$i_{d, \text{IIDG2}}/\text{A}$	150.811	153.501	1.78	—
$i_{q, \text{IIDG2}}/\text{A}$	-31.177	-32.963	5.73	—
$U_{fa(1), \text{IIDG3}}/\text{kV}$	5.694($\angle -0.95^\circ$)	5.761($\angle -0.98^\circ$)	1.18	3.16
$I_{fa, \text{IIDG3}}/\text{kA}$	0.059($\angle -0.95^\circ$)	0.061($\angle -1.06^\circ$)	3.39	3.77
$i_{d, \text{IIDG3}}/\text{A}$	58.685	60.674	3.39	—
$i_{q, \text{IIDG3}}/\text{A}$	0	0	0	—

由表 3 可知,母线 E 发生两相短路时的故障仿真数据与 PSO 计算得到的故障数据也基本一致,部分故障数据因其基础数值较小,导致相对误差略大,但绝对误差很小。综合以上故障测试结果,验证了本研究提出的故障等效模型的正确性以及求解方法的准确性,可以用于含 IIDG 配电系统的保护整定计算工作。

4.2 电流保护整定结果与校验

当 IIDG1、IIDG2 与 IIDG3 的并网额定容量均为 1 MVA 时,根据本研究所提的故障模型及求解方法,图 6 中考虑 IIDG 接入后各保护的整定值如表 4 所示。此时,各保护的保护区或灵敏度如表 5 所示,其中

$l_{\min}$ 与 $l_{\max}$ 表示电流 I 段最小与最大保护范围。从表 5 可以看出,各段的保护范围或灵敏度均满足要求。

表 4 考虑 IIDG 接入后的电流保护位置及整定值

Table 4 Current protection position and setting values after IIDG access are considered

线路名称	长度/km	阻抗/ Ω	保护编号	$I_{\text{set}}^{\text{I}}/\text{kA}$	$I_{\text{set}}^{\text{II}}/\text{kA}$	$I_{\text{set}}^{\text{III}}/\text{kA}$
AB	2	$0.686+\text{j}0.700$	CB1	5.639	0.583	0.262
BC	3	$1.029+\text{j}1.050$	CB2	2.690	0.530	0.210
CD	5	$1.715+\text{j}1.750$	CB3	1.415	0.482	0.157
DE	8	$2.744+\text{j}2.800$	CB4	0.863	0.438	0.105
EL1	2	$0.686+\text{j}0.700$	CB5	—	—	0.052
AF	2	$0.686+\text{j}0.700$	CB6	5.647	0.832	0.210
FG	3	$1.029+\text{j}1.050$	CB7	2.658	0.756	0.157
GH	6	$2.058+\text{j}2.100$	CB8	1.328	0.687	0.105
HL2	2	$0.686+\text{j}0.700$	CB9	—	—	0.052

表 5 各段保护范围或灵敏度

Table 5 Protection range or sensitivity of each segment

线路名称	保护编号	I 段 $l_{\min}/\%$	I 段 $l_{\max}/\%$	II 段	III 段近后备	III 段远后备
AB	CB1	29.124	76.952	5.683	12.647	6.612
BC	CB2	28.063	68.507	3.283	8.303	4.583
CD	CB3	27.915	65.275	1.973	6.051	3.506
DE	CB4	18.872	61.986	1.300	5.430	4.906
EL1	CB5	—	—	—	9.811	—
AF	CB6	28.856	77.098	4.037	16.029	8.284
FG	CB7	27.541	67.954	2.296	11.045	5.593
GH	CB8	31.895	67.465	1.300	8.523	7.301
HL2	CB9	—	—	—	14.602	—

以图 6 中母线 E 发生三相金属性短路为例,分别用基础的粒子群算法以及其他常用优化算法与本研究改进后的粒子群算法对故障模型进行求解,并对比其收敛过程,对比结果如表 6 所示。从表 6 可以看出,改进 PSO 算法初始适应度值较小,初始种群分布合理,收敛迭代次数也小于基础 PSO 与其他常用优化算法。

同时,各算法在求解过程收敛曲线对比如图 9 所示,可以看出,改进后的算法具有更好的搜索能力,收敛速度也优于改进前粒子群算法和其他常用优化算法,验证了改进后 PSO 算法对故障模型求解的有效性。

表 6 算法收敛情况对比

Table 6 Comparison of algorithm convergence

算法名称	初始适应度值	收敛迭代次数	收敛精度	100 次迭代适应度
蚁群算法	3 240	34	1.423×10^{-6}	4.629×10^{-9}
遗传算法	4 038	47	9.774×10^{-6}	1.210×10^{-9}
模拟退火算法	4 107	54	2.248×10^{-6}	3.885×10^{-8}
改进前 PSO 算法	3 621	29	1.815×10^{-6}	6.635×10^{-13}
布谷鸟算法	4 027	23	8.479×10^{-6}	1.214×10^{-12}
改进 PSO 算法	3 225	16	1.677×10^{-6}	1.663×10^{-13}

5 结论

本研究提出一种计及 IIDG 的 LVRT 控制流程的主动配电网故障等效模型,采用改进粒子群算法对故障模型进行迭代求解,并给出考虑 IIDG 接入后的电流保护整定方案,得到以下结论。

1) 故障等效模型考虑 IIDG 的 LVRT 控制策略和压控特性,使用迭代方法求解,仿真验证了故障等效模型的正确性和求解方法的准确性。

2) IIDG 进入 LVRT 模式后具有“弱馈”特性,通过对故障模型的迭代求解,实现了故障参数的精确计算,为电流保护整定与校验提供依据。

3) 改进后 PSO 算法对主动配电网故障等效模型具有更优的求解能力和收敛速度。

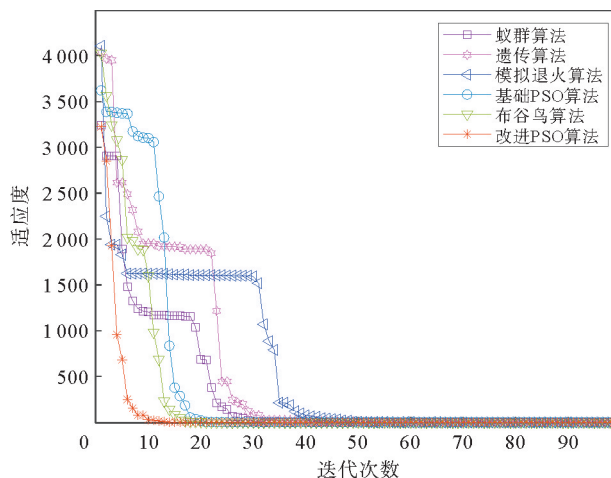


图9 算法收敛曲线对比

Fig. 9 Comparison of algorithm convergence curves

参考文献:

- [1] OLADEJI I, MAKOLO P, ABDILLAH M, et al. Security impacts assessment of active distribution network on the modern grid operation: A review[J/OL]. Electronics, 2021, 10(16). DOI:10.3390/electronics10162040.
- [2] 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): 146-153.
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): 146-153.
- [3] MESKIN M, DOMIJAN A, GRINBERG I. Impact of distributed generation on the protection systems of distribution networks: Analysis and remedies-review paper[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2020, 14(24): 5944-5960.
- [4] 缪希仁, 赵丹, 刘晓明, 等. 含分布式电源配电网短路保护研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 3006-3019.
MIAO Xiren, ZHAO Dan, LIU Xiaoming, et al. A research review of short-circuit protection in distribution network with distributed generation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3006-3019.
- [5] 王江海, 邵能灵, 宋凯, 等. 考虑继电保护动作的分布式电源在配电网中的准入容量研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 37-43.
WANG Jianghai, TAI Nengling, SONG Kai, et al. Penetration level permission for DG in distributed network considering relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 37-43.
- [6] 金雪芬, 戴朝波, 武守远, 等. 故障电流限制器对继电保护的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 98-105.
JIN Xuefen, DAI Chaobo, WU Shouyuan, et al. Influence of fault current limiter on protective relaying[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 98-105.
- [7] 刘凯, 李幼仪. 主动配电网保护方案的研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2584-2590.
LIU Kai, LI Youyi. Study on solutions for active distribution grid protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2584-2590.
- [8] 张惠智, 李永丽. 光伏电源接入的配电网短路电流分析及电流保护整定方案[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2327-2332.
ZHANG Huizhi, LI Yongli. Short-circuit current analysis and current protection setting scheme of distribution network with photovoltaic power[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2327-2332.
- [9] CHEN Z, PEI X, YANG M, et al. A novel protection scheme for inverter-interfaced microgrid (IIM) operated in islanded mode[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7684-7697.
- [10] SOLEIMANISARDOO A, KAREGAR K H, ZEINELDIN H H. Differential frequency protection scheme based on off-nominal frequency injections for inverter-based islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2107-2114.
- [11] 邓靖雷, 姚良忠, 徐箭, 等. 一种基于附加谐波电流信号的主动配电网线路保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(4): 1409-1424.

- DENG Jinglei, YAO Liangzhong, XU Jiang, et al. An additional harmonic based line protection method of active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(4): 1409-1424.
- [12] 彭春华, 张艳伟. 基于电流正序分量相位比较的主动配电网保护方案[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 163-169.
PENG Chunhua, ZHANG Yanwei. Protection scheme based on phase comparison of positive-sequence fault current for active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 163-169.
- [13] 赵凤贤, 孟镇, 李永勤. 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. Pilot protection scheme for active distribution network based on fault components[J]. High Voltage Technology, 2019, 45(10): 3092-3100.
- [14] 王宁, 韩国栋, 高厚磊, 等. 有源配电网电流差动保护判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 14-23.
WANG Ning, HAN Guodong, GAO Houlei, et al. The current differential protection criterion of active distribution networks[J]. Power Systems Protection and Control, 2023, 51(7): 14-23.
- [15] ZHOU C H, ZOU G B, ZANG L D, et al. Current differential protection for active distribution networks based on improved fault data self-synchronization method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 13(1): 166-178.
- [16] 余磊, 贾科, 温志文, 等. 计及量测数据丢失的主动配电网电流保护自适应整定方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 145-152.
YU Lei, JIA Ke, WEN Zhiwen, et al. Adaptive setting method of over current protection in active distribution network considering measurement data missing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 145-152.
- [17] 曾德辉, 王刚, 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.
- [18] 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): 1862-1869.
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): 1862-1869.
- [19] 国家能源局. 光伏并网逆变器技术规范: NB/T 32004-2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
National Energy Administration. Technical specification of PV grid-connected inverter: NB/T 32004-2018[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- [20] 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-EPSC, 2018, 30(7): 16-23.
- [21] TIAN S J, LU M, WANG R K, et al. Research on the control method of the PV grid-connected inverter under an asymmetrical power grid fault[J/OL]. Energies, 2023, 16(22). DOI:10.3390/en16227504.
- [22] JAINM, SAIHJPAL V, SINGH N, et al. An overview of variants and advancements of PSO algorithm[J/OL]. Applied Sciences, 2022, 12(17). DOI:10.3390/app12178392.
- [23] WANG W T, TIAN J. An improved nonlinear tuna swarm optimization algorithm based on circle chaos map and levy flight operator[J/OL]. Electronics, 2022, 11(22). DOI:10.3390/electronics11223678.
- [24] 明振兴, 吕清花, 明月, 等. 基于改进粒子群算法的 LED 光源阵列优化[J]. 应用光学, 2022, 43(3): 524-531.
MING Zhenxing, LYU Qinghua, MING Yue, et al. Optimization of LED light source array based on improved particle swarm algorithm[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(3): 524-531.
- [25] 秦毅, 彭力. 带过滤机制非线性惯性权重粒子群算法[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(16): 35-38.
QIN Yi, PENG Li. Nonlinear inertial weight particle swarm optimization with filtering mechanism[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(16): 35-38.
- [26] 贺家李, 李永丽, 董新洲, 等. 电力系统继电保护原理[M]. 5 版. 北京: 中国电力出版社, 2018: 372-374.
HE Jiali, LI Yongli, DONG Xinzhou, et al. Principles of power system relay protection[M]. 5th edition. Beijing: China Electric Power Press, 2018: 372-374.