

高比例构网型逆变型分布式电源接入下的 微电网就地保护方案

曹金铭¹, 范开俊¹, 徐丙垠^{1,2}, 李娟³, 武岳⁴, 王小丹¹, 徐宝锐¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东省 淄博市 255000;

2. 山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东省 淄博市 255000;

3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏省 南京市 221103;

4. 国网山东省电力公司临沂供电公司, 山东省 临沂市 276000)

On-site Protection Scheme for Microgrid With High Penetration Rate of Grid-forming Inverter Interfaced Distributed Energy Resources

CAO Jinming¹, FAN Kaijun¹, XU Bingyin^{1,2}, LI Juan³, WU Yue⁴, WANG Xiaodan¹, XU Baorui¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong Province, China;

2. Shandong Kehui Electric Automation Co., Ltd., Zibo 255000, Shandong Province, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Electric Power Science Research Institute, Nanjing 221103, Jiangsu Province, China;

4. Linyi Power Company, State Grid Shandong Electric Power Co., Ltd., Linyi 276000, Shandong Province, China)

ABSTRACT: Renewable energy represented by grid-forming inverter-interfaced distributed energy resources (DERs) are increasingly connected to microgrids that can operate independently and have various modes, resulting in traditional relay protection schemes that cannot meet the requirements of protection selectivity and speed. To address this issue, the fault characteristics of grid-forming DERs are analyzed. On this basis, the current, voltage and phase angle characteristics between them under the microgrids' grid-connected/islanded operation mode are analyzed. To tackle the problem that the traditional protection loses selectivity, the phase angle difference between the pre-fault voltage and the post-fault current is used to determine the fault direction. Additionally, an internal fault acceleration factor, combining the integrated phase angle difference and the measured impedance, is introduced to enhance the action equation of the inverse-time overcurrent protection. Furthermore, a low-voltage protection criterion based on comprehensive phase angle difference characteristics is established to address the challenge of insufficient fault current to trigger inverse-time overcurrent protection during two-phase short-circuit faults in the islanded state. This leads to a microgrid protection scheme that

integrates the improved inverse-time overcurrent protection with low-voltage protection. The model is built by PSCAD. The theoretical analysis and simulation results show that the scheme can operate quickly and reliably in the grid-connected/islanded operation state of the microgrid, which verifies the effectiveness of the proposed protection scheme.

KEY WORDS: microgrid; inverter-interfaced distributed energy resources; voltage and current phase angle difference; inverse-time overcurrent protection; low voltage protection; speed

摘要:以构网型逆变式分布式电源为代表的可再生能源越来越多地接入可以独立运行、模式多样的微电网中,导致传统继电保护方案无法满足保护选择性和速动性等的要求。为此,对构网型分布式电源的故障特性进行了分析,在此基础上分析了微电网并/离网运行模式下的电流、电压及其之间的相角特性;针对传统保护失去选择性的问题提出以故障前电压与故障后电流的相角差来判断故障方向,以综合相角差和测量阻抗的区内故障加速因子来改进反时限过电流保护的动作方程,针对离网状态下发生两相短路故障时故障电流过小反时限过电流保护无法启动的问题设置了综合相角差特征的低电压保护判据,从而得到综合了改进反时限过电流保护和低电压保护的微电网保护方案。通过PSCAD搭建模型进行了仿真,理论分析与仿真结果表明该方案在微电网并/离网运行状态下均能快速可靠动作,验证了所提保护方案的有效性。

关键词: 微电网; 逆变型分布式电源; 电压电流相角差; 反

基金项目: 国家自然科学基金项目(51037003); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2022QE100)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (51037003), Project Supported by Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2022QE100).

时限过电流保护；低电压保护；速动性

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1882

0 引言

近年来,随着现代能源体系的建设,越来越多的分布式电源(distributed energy resources, DERs)接入电力系统^[1-2],由分布式发电装置、分布式储能装置与监控和保护装置汇集而成,可以在本地配电网中安全高效地运行,也可以在小范围配电网中以离网模式运行的微电网^[3-4],以其运行灵活、快速响应的优点受到青睐。《“十四五”现代能源体系规划》提出,积极发展以消纳新能源为主的智能微电网,实现与大电网兼容互补;鼓励具备条件的重要用户发展分布式电源和微电网^[5]。大电网与微电网同步发展被写入能源规划,从体制层面规划了我国电网未来运行的崭新场景。但含高比例逆变型分布式电源(inverter-interfaced distributed energy resources, IIDERs)的微电网在并/离网两种运行模式下的故障电流差异较大^[6-7],且电流方向具有不确定性,导致保护在微电网中动作的快速性、选择性等都面临挑战^[8-10]。

为此,一些学者提出了基于通信的微电网保护方案,如文献[11-12]基于微电网正序故障分量的特征,在相邻保护单元间通信联络,从而判断与定位故障,该方案依赖通信且适用于并网运行的微电网;文献[13-14]将微电网区域化,分别通过 GOOSE 跳闸信号的传递和反时限差动电流保护实现故障隔离;文献[15-16]利用故障电流相位关系,分别通过电压和电能变化量来判断故障,均依赖于母线两端通信;文献[13-16]所提方案可适用于微电网并网和离网运行模式,但保护方案的实现基于通信,对通信系统要求较高,成本也较高。在微电网就地保护研究方面,文献[17]通过可编程微处理器的定向元件继电器,对不同场景、不同安装位置的继电器进行设置,在并网和离网运行模式下均能可靠动作,该方案保护动作时间较长且配置复杂,可作为后备保护;文献[18-19]通过改进反时限过电流保护以提高保护的動作速度,可适用于并/离网运行状态,但方案只考虑了微电网联络馈线上单侧的保护,未提及反时限过电流保护在微电网故障电流较小时如何启动的问题。此外,还有利用非工频信号注入法^[20]和控制器谐波分析法^[21]来实现微电网保护的方案,实现较复杂,成本可能会增加。

综上,目前对于微电网就地式保护的研究尚不

完备,亟需一种能够适应微电网并/离网运行模式的就地式微电网保护方案。为此,本文提出了一种综合改进反时限过电流保护和低电压保护的就地式微电网保护方法,该方法基于故障前电压和故障电流之间的相角差来识别故障方向,利用改进反时限过电流保护和低电压保护进行故障切除,该方法在并/离网模式下都能有选择地对故障进行就地快速切除,不依赖于通信,经济性好。

1 构网型 IIDER 故障特性

根据 IIDER 在交流微电网中的运行情况,变流器接口发电机大致分为以下 3 种^[22-24]:跟网型(grid-following, GFL)、构网型(grid-forming, GFM)和网络支持型。现有文献大多以分析跟网型 IIDER 为主,其通过锁相环测量并网点(point of common coupling, PCC)的相位信息来调整变流器出力,会在系统强度弱、物理惯性低的微电网中存在稳定性问题。构网型 IIDER 具有类似同步机的能力,能够自主维持功角、频率、电压等的稳定,在高比例 IIDER 微电网中能为系统提供支撑能力。随着 IIDER 在微电网中的占比越来越高,构网型 IIDER 必将在未来微电网中占据更重要的位置^[25-26]。本节对构网型 IIDER 进行分析,作为后续分析高比例构网型 IIDER 微电网故障特征的基础。

构网型 IIDER 具有电压源属性,其故障时所能提供的电流水平受到电力电子开关的过电流限制。构网型 IIDER 的等值模型为受控电流源(controlled current source, C-CS)或受控电压源(controlled voltage source, C-VS),如附录 A 图 A1(a)(b)所示。短路时,构网型 IIDER 瞬间反应($\dot{U}_t$ 下降),当 I_k 小于 $I_{\max}$ 时,将其建模为 C-VS,当 I_k 大于等于 $I_{\max}$ 时,将其建模为 C-CS,如式(1)和式(2)。

$$\dot{I}_k = \frac{(\dot{U}_k - \dot{U}_t)}{Z_k}, |\dot{I}_k| < I_{\max} \quad (1)$$

$$|\dot{I}_k| = I_{\max}, |\dot{I}_k| \geq I_{\max} \quad (2)$$

式中: $\dot{U}_k$ 、 $\dot{I}_k$ 为逆变器内部输出的电压和电流, Z_k 为逆变器内部的等效阻抗; $\dot{U}_t$ 为分布式电源的并网点电压; $I_{\max}$ 为分布式电源的最大输出电流。在电力系统短路计算中,构网型 IIDER 建模为电流源, Z_k 为无限大(开路)。

构网型 IIDER 需要具备强大的故障穿越能力,GB/T 29319—2024《光伏发电系统接入配电网技术规定》^[27]中包含关于 IIDER 低电压穿越的要求。设 ∂ 为电压跌落系数, $\partial = U_t / U_N$, U_N 为系统额定电压。当 $I_{\max}$ 取 1.2pu 时,构网型 IIDER 整个故障穿

从图 4 可以看出: $\dot{I}'_{A4}$ 和 $\dot{I}'_{D1}$ 均滞后于故障前电压, $\dot{I}'_{D3}$ 超前于故障前电压, 可得: 对于保护 A₄, $\dot{U}_A$ 与 $\dot{I}'_{A4}$ 的相角差 $\Delta\phi_{A4} = \arg(\dot{U}_A / \dot{I}'_{A4}) > 0^\circ$, 故障前电压与故障电流相角差为正; 对于保护 D₁, $\dot{U}_D$ 与

$\dot{I}'_{D1}$ 的相角差 $\Delta\phi_{D1} = \arg(\dot{U}_D / \dot{I}'_{D1}) > 0^\circ$ ，故障前电压与故障电流相角差亦为正；对于保护 D_3 ， $\dot{U}_D$ 与 $\dot{I}'_{D3}$ 的相角差 $\Delta\phi_{D3} = \arg(\dot{U}_D / \dot{I}'_{D3}) < 0^\circ$ ，故障前电压与故障电流相角差为负。

对故障发生在并网微电网的配电网侧 F2 点、负荷馈线 F3 点、分布式电源馈线 F4 点时的故障特征进行分析，发生故障时的故障相角分别如附录 A 图 A3、A4、A5 所示，各点故障前电压与故障后电流相角差如附录 A 式(A1)~(A3)。可知，在并网状态下保护的正方向发生故障时，保护处故障前母线正序电压与故障后正序故障电流相角差均属于 $(0^\circ, 180^\circ)$ 。

2.2 离网状态下的故障特征

2.2.1 D 单元微电网独立运行

单元级微电网是微电网中具有独立运行能力的最小供电单元，其独立运行时，联络馈线 A_4D_1 断开，D 单元微电网处于源荷平衡状态；若负荷馈线上 F3 点发生故障，可将故障网络等效为故障前的系统非故障状态与故障附加状态的叠加，如附录 A 图 A6 所示。

故障前流过保护 D_2 和保护 D_3 的电流 $\dot{I}_{D2}$ 和 $\dot{I}_{D3}$ 为

$$\dot{I}_{D2} = -\dot{I}_{D3} = \dot{I}_{IIDER3} \quad (8)$$

保护 D_2 和保护 D_3 处电流的故障分量 $\dot{I}_{FD2}$ 和 $\dot{I}_{FD3}$ 为

$$\dot{I}_{FD2} = -\dot{I}_{FD3} = \Delta\dot{I}_{IIDER3} \quad (9)$$

F3 点故障时，保护 D_2 和保护 D_3 处的电流 $\dot{I}'_{D2}$ 和 $\dot{I}'_{D3}$ 为

$$\dot{I}'_{D2} = -\dot{I}'_{D3} = \dot{I}_{IIDER3} + \Delta\dot{I}_{IIDER3} \quad (10)$$

相应的电压电流相量关系如图 5 所示。

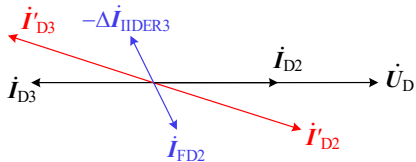


图 5 D 单元微电网独立运行下 F3 点故障相角图

Fig. 5 Stand-alone D unit microgrid F3 fault phase angle diagram

从图 5 可以看出： $\dot{I}'_{D2}$ 滞后于故障前电压， $\dot{I}'_{D3}$ 超前于故障前电压，可得：对于保护 D_2 ， $\dot{U}_D$ 与 $\dot{I}'_{D2}$ 的相角差 $\Delta\phi_{D2} = \arg(\dot{U}_D / \dot{I}'_{D2}) > 0^\circ$ ，故障前电压与故障电流相角差为正；对于保护 D_3 ， $\dot{U}_D$ 与 $\dot{I}'_{D3}$ 的相角差 $\Delta\phi_{D3} = \arg(\dot{U}_D / \dot{I}'_{D3}) < 0^\circ$ ，故障前电压与故障电流相角差为负。

2.2.2 D 单元微电网非独立运行

单元级微电网有时也会通过联络馈线与系统级或馈线级微电网相连，如图 1 中的 D 单元微电网通过联络馈线 A_4D_1 与 A 母线所带的系统级微电网相连，以系统级微电网离网运行。

非独立运行状态下，联络馈线上的 A_4 、 D_1 闭合，D 单元微电网基本处于源荷平衡的状态，联络馈线 A_4D_1 上的电流相比于负荷电流来说可以忽略，故障前的故障等值网络如附录 A 图 A6(a)所示，故障前流过保护 D_2 和保护 D_3 的电流 $\dot{I}_{D2}$ 和 $\dot{I}_{D3}$ 如式(8)；若联络馈线上 F1 点发生故障，其故障附加状态的等值网络如附录 A 图 A7 所示， $\Delta\dot{I}_{IIDER.W}$ 为通过 A_4 左侧微电网中所有其他 IIDER 提供的总的短路电流。

保护 A_4 和保护 D_1 处电流的故障分量 $\dot{I}_{FA4}$ 和 $\dot{I}_{FD1}$ 分别为

$$\dot{I}_{FA4} = \Delta\dot{I}_{IIDER.W} \quad (11)$$

$$\dot{I}_{FD1} = -(\dot{I}_{FD2} + \dot{I}_{FD3}) \approx \dot{I}_{D2} + \frac{Z_{D2}}{Z_{D2} + Z_{DF1}} \Delta\dot{I}_{IIDER3} \approx \dot{I}_{IIDER3} + \Delta\dot{I}_{IIDER3} \quad (12)$$

F1 点故障时，保护 A_4 和保护 D_3 的电流 $\dot{I}'_{A4}$ 和 $\dot{I}'_{D3}$ 分别为

$$\dot{I}'_{A4} = \Delta\dot{I}_{IIDER.W} \quad (13)$$

$$\dot{I}'_{D1} = \dot{I}_{IIDER3} + \Delta\dot{I}_{IIDER3} \quad (14)$$

相应的电压电流相量关系如图 6 所示。

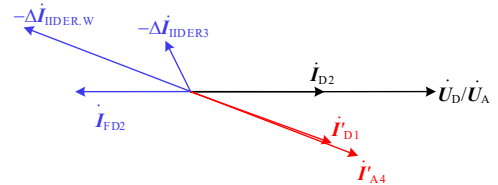


图 6 D 单元微电网非独立运行下 F1 故障相角图

Fig. 6 Non-standalone D unit microgrid F4 fault phase angle diagram

从图 6 可以看出： $\dot{I}'_{A4}$ 、 $\dot{I}'_{D1}$ 均滞后于故障前电压， $\dot{I}'_{D1}$ 超前于故障前电压，可得：对于保护 A_4 ， $\dot{U}_A$ 与 $\dot{I}'_{A4}$ 的相角差 $\Delta\phi_{A4} = \arg(\dot{U}_A / \dot{I}'_{A4}) > 0^\circ$ ，故障前电压与故障电流相角差为正；对于保护 D_1 ， $\dot{U}_D$ 与 $\dot{I}'_{D1}$ 的相角差 $\Delta\phi_{D1} = \arg(\dot{U}_D / \dot{I}'_{D1}) > 0^\circ$ ，故障前电压与故障电流相角差为正。

同理，分析故障发生在非独立运行微电网的负荷馈线、联络馈线时的故障特征，当 F3、F4 点发生故障时，故障相角分别如附录 A 图 A8、A9 所示，各点故障前电压与故障后电流相角差如附录 A 式(A4)(A5)。可知，在离网状态下保护的正方向发生

故障时,保护处故障前母线正序电压与故障后正序故障电流相角差亦均属于 $(0^\circ, 180^\circ)$ 。

2.3 离网状态下两相短路时电流、电压特性分析

当离网微电网联络馈线上发生两相短路时,故障电流比其他故障情况下的短路电流小很多,可能会导致反时限过电流保护不能正常启动,为此,对发生两相故障时的故障特征进行分析,以图1中的F6点故障为例(等效电路见图7),此时,IIDER2的供电对象是正序与负序负荷阻抗的并联。

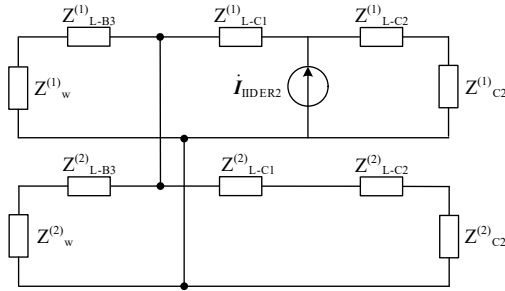


图7 F6点两相短路故障系统侧开关跳闸后等效电路

Fig. 7 F6 two-phase short-circuit fault system side switch after tripping equivalent circuit

图7中 Z_w 为故障点左侧的等效阻抗,左侧经过阻抗的并联, Z_w 进一步下降,因此不能忽略故障点左侧的分流。由图7分析得出:

1) 如果故障点左侧并联的线路较多,左侧的总阻抗会略小于右侧,线路上具体流过保护 C_1 、 C_2 的电流需要根据阻抗分流计算,同时测量阻抗的增大也会延长反时限过电流保护动作的时间。

2) 流过负荷支路的最大故障电流为分布式电源输出的故障电流的1/2,又由于该单元微电网的渗透率为100%,分布式电源输出的故障电流值为额定电流值的1.2倍,因此两相短路时的故障电流可能低于正常运行时的电流,无法根据电流值检测到故障。

3) C_1 上的电压值不大于正常电压的50%,整个系统中各处保护的电压值均下降,且由于短路电流较小,微电网中线路较短,各保护安装处的电压差异不明显。

2.4 小结

综上所述可知:

1) 在各种场景下,故障前母线正序电压与故障后正序故障电流相角差均属于 $(0^\circ, 180^\circ)$,因此,可利用母线故障前正序电压与各馈线正序故障电流的相角特性来可靠地区分正反向故障。

2) 针对离网状态下两相短路时故障电流过小导致电流保护无法启动的问题,可综合利用相角差及故障时电压下降的特征来实现故障的切除。

3 微电网保护方案

在含高比例IIDER的微电网中,故障电流的大小和方向与传统配电网不同,反时限过电流保护可根据短路电流大小来确定故障的切断时间而在微电网保护研究^[14,18-19,33-34]中得到了学者们的关注。但高比例构网型IIDER接入下的微电网短路电流较小,传统的反时限过电流保护可能由于达不到启动电流值而拒动;同时微电网中的电流方向具有双向性,传统的反时限过电流保护可能会误动;且单独靠电压量难以满足保护选择性的要求。因此,本文通过对微电网并/离网运行模式下故障特征的分析,提出一种综合利用故障前后电压、电流特征的微电网保护方法,实现微电网并/离网模式下故障的快速有选择性的切除,该方法仅利用就地信息,不需要通信设备,经济性好,保护动作方程及整定过程具体阐述如下。

3.1 保护动作方程

3.1.1 改进反时限过电流保护

将所提故障前正序电压与故障后正序电流的相角差和测量阻抗引入反时限过电流保护动作方程,可得适合微电网保护的改进反时限过电流保护动作方程,如式(15)所示。

$$t = \frac{0.14 \cdot t_{\text{TDSm},ij} \cdot M'}{(I_f / I_{\text{opm},ij}) - 1} \quad (15)$$

式中: M' 表示综合相角差和测量阻抗的区内故障加速因子, $M' = (\sin \alpha_{ij} / |\sin \alpha_{ij}|) \cdot (Z_m / Z_{\text{line}})$ 。

$t_{\text{TDSm},ij}$ 为保护 ij 在并/离网模式下的时间整定系数; i 为母线编号,如图1中的A、B、C、D, j 为馈线编号,如图1中的1、2、3、4; m 表示微电网的运行状态,用G表示并网状态(grid-connected),I表示离网状态(islanded); I_f 为故障电流值; $I_{\text{opm},ij}$ 为保护 ij 的启动电流值; $\alpha_{ij} = \arg(\dot{U}_i / \dot{I}'_{ij})$ 为故障前电压与故障后电流的相位差; $\dot{U}_i$ 为母线 i 处的故障前电压, $\dot{I}'_{ij}$ 为馈线 ij 所流过的故障后电流; Z_m 为测量阻抗(测量电压采用故障前的记忆电压); Z_{line} 为保护安装处到本馈线末端的线路阻抗。

由式(15)可知,改进后的反时限过电流保护动作方程中包含以下几点要素:

1) 微电网并网运行时,系统侧电源与分布式电源共同提供短路电流,数值能达到额定电流的6~8倍;微电网离网运行时,分布式电源提供的短路电流仅能达到额定电流的1.2~2倍。因此分别整定并网状态下的 $I_{\text{opG},ij}$ 、 $t_{\text{TDSG},ij}$ 和离网状态下的 $I_{\text{opI},ij}$ 、 $t_{\text{TDSI},ij}$ 。

2) M' 的作用: 1) 可用于区分正反向故障, 流过正向故障电流时, $(\sin \alpha_{ij} / |\sin \alpha_{ij}|) > 0, t > 0$; 流过反向故障电流时, $(\sin \alpha_{ij} / |\sin \alpha_{ij}|) < 0, t < 0$; 2) 可加速故障的切除, 通过测量阻抗对较近的故障点加速切除。区内故障时, $Z_m / Z_{line} < 1$, 保护时间缩短; 区外故障时, $Z_m / Z_{line} > 1$, 保护时间延长。

3.1.2 低电压保护

根据 GB/T 14285—2023《继电保护和安全自动装置技术规程》和 GB/T 29319—2024《光伏发电系统接入配电网技术规定》, 电压低于 $85\%U_N$ 即为不正常工作状态, 分布式电源处于低电压穿越状态, 应快速切除故障线路, 恢复非故障区供电。将电压保护与角度判据结合, 以电压不正常工作状态为低电压动作定值, 当线路电压跌落至 $85\%U_N$ 以下, 且角度判据确定为正方向故障, 由低电压保护与角度判据共同组成保护动作判据^[18,35], 低电压保护的动作为条件为

$$\begin{cases} U_{opm,ij} < 0.85pu \\ (\sin \alpha_{ij} / |\sin \alpha_{ij}|) > 0 \end{cases} \quad (16)$$

3.2 保护参数整定

为了确保上下级保护之间的协调, 须根据保护位置的不同选用适当的保护参数。以图 1 所示微电网为例, 对分布式电源馈线、负荷馈线、联络馈线 3 种情况进行整定。以联络馈线为例说明保护参数的整定过程, 分布式电源馈线及负荷馈线的整定过程见附录 B 的 B.1、B.2。

3.2.1 并网状态改进反时限

1) 启动电流值。

首先计算并网状态下靠近系统侧各保护安装处的启动电流值, 以图 1 中 D_1 - A_4 - A_3 - B_1 - B_3 - C_1 线路为例。为确保靠近系统侧的保护 A_4 、 A_3 和 B_3 有选择性的动作, 各保护动作方程的曲线形状系数及平移系数均一致, 其启动电流参数可按式(17)进行整定。

$$I_{opG,ij} = K_{rel} K_{ss} / K_{re} \cdot I_{ij,max} \quad (17)$$

对于远离系统侧的保护 D_1 、 B_1 、 C_1 , 正常运行时, 检测到的电流主要为负荷电流; 联络馈线上发生故障时, 流过的电流主要为分布式电源提供的反向故障电流。由微电网的供电特性可知, 线路末端与用户距离较近的 IIDER 应就地给用户供电, 剩余电量送到大电网, 在微电网规划设计时, 需要考虑新能源出力和负荷功率的平衡问题, 远离系统侧的保护参数整定, 应根据所带微电网单元的源荷比不同分为以下两种情况:

① “源大于荷”。

“源大于荷”场景下, 正常运行时, 分布式电源为附近的负荷供电, 剩余电流流向配电网, 以图 8 中连接 C 单元微电网的 C_1 为例, 流过 C_1 的电流可表示为

$$I_{C1} = I_{DER2} - I_{L3} \quad (18)$$

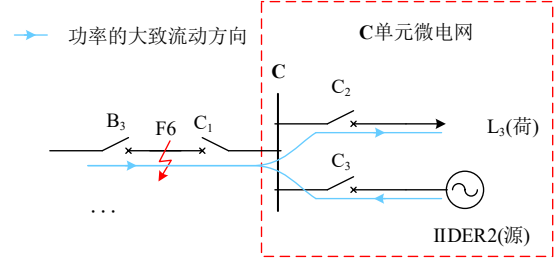


图 8 与 C_1 连接的 C 单元微电网

Fig. 8 C unit microgrid connected to circuit breaker C_1

由式(18)可知 $I_{C1} < I_{DER2}$, 当图 8 中微电网并网状态下 $F6$ 点发生故障时, 假定负荷的影响可忽略不计, 分布式电源电流全部流向故障点, 此时分布式电源电流输出为 $1.2I_{DER2}$, 如式(19)所示。

$$I_{C1,F6} = 1.2I_{DER2} \quad (19)$$

② “源小于荷”。

“源小于荷”场景下, 正常运行时, 分布式电源的电流全部流向负荷, 此时流过 C_1 的电流由系统侧提供, 可以表示为

$$I_{C1} = -(I_{L3} - I_{DER2}) \quad (20)$$

负号表示与规定正方向相反。当 $F6$ 点发生故障时, 假定负荷的影响可忽略不计, 分布式电源电流全部流向故障点, 此时的分布式电源电流输出为 $1.2I_{DER2}$, 同式(19)。

在 $F6$ 点发生故障时, 几种源荷比下保护 C_1 处的故障前与故障后电流的大小及方向如表 1 所示。

表 1 5 种源荷比下 C_1 处的故障电流大小及方向
Table 1 Fault current size and direction at C_1 for five source-charge ratio

源荷比 λ	C_1 故障前电流及方向	C_1 故障后电流及方向
0	I_{L3} →	0 ←
50%	$0.5I_{L3}$ →	$0.6I_{L3}$ ←
75%	$0.25I_{L3}$ →	$0.9I_{L3}$ ←
100%	0 —	$1.2I_{L3}$ ←
150%	$0.5I_{L3}$ ←	$1.8I_{L3}$ ←
200%	I_{L3} ←	$2.4I_{L3}$ ←

注: →表示电流由线路流向母线; ←表示电流由母线流向线路。

由表 1 分析可得, 流过 C_1 的故障电流差值为

$$\Delta I_{C1} = (0.2\lambda + 1)I_{L3} \quad (21)$$

为保证保护在不同 λ 情况下均能可靠动作, 同时考虑保护的灵敏性, 本文设线路故障前电流值再加上 0.5 倍故障前后电流差值之和为启动电流值, 如式(22)所示。

$$I_{opG,ij} = (\lambda - 1)I_L + 0.5(0.2\lambda + 1)I_L \quad (22)$$

式中: λ 为联络馈线所连接微电网的源荷比; I_L 为微电网所带负荷的额定电流。根据公式(22)整定时, 当源荷比小于 0.455 时, 整定电流值会出现负值, 此时启动值取 0。因此联络馈线远离系统侧保护启动电流的整定公式为

$$I_{opG.gj} = \begin{cases} (1.1\lambda - 0.5)I_L, & \lambda \geq 0.455 \\ 0, & \lambda < 0.455 \end{cases} \quad (23)$$

2) 时间整定系数。

为确保保护在时间上的配合, 首先整定保护 B_3 , B_3 的启动电流用 $I_{opG.B3}$ 表示, 根据选择性要求, 在 C_2 线路出口发生最严重故障时, 保护 B_3 的动作时间比保护 C_2 高 Δt 。由于保护 C_2 瞬时动作, 可设保护 B_3 的动作时刻 $t_{B3} = \Delta t$, 代入公式(15), 可得保护 B_3 的时间常数, 如式(24)所示。

$$t_{TDSG.B3} = \frac{[(I_{f.C2.max} / I_{opG.B3}) - 1]\Delta t}{0.14 \cdot M'} \quad (24)$$

对于保护 A_3 , B_3C_1 线路出口(靠近 B_3)发生最严重故障时, 保护 A_3 的动作时间比保护 B_3 高 Δt 。整定过程与保护 B_3 类似。

根据选择性要求, 当 F5 点发生故障时, 分布式电源提供的故障电流流过 B_1 、 C_1 , 应该由 B_1 跳开故障, 母线 B 之后的电源和负荷还能构成一个小型微电网单元恢复供电, 因此, 保护 B_1 的动作时间应尽可能小, 在线路 A_3B_1 末端(靠近 B_1)发生最严重故障时, 保护 B_1 应瞬时动作, 即

$$t_{TDSG.B1} = \frac{[(I_{f.B1.max} / I_{opG.B1}) - 1]t_b}{0.14 \cdot M'} \quad (25)$$

在线路 A_3B_1 末端(靠近 B_1)发生最严重故障时, 保护 C_1 的动作时间比保护 B_1 高 Δt 。经过整定后, 联络馈线上的时间配合关系如附录 A 图 A10 所示。离网状态下改进反时限过电流保护的整定与并网状态下类似, 详见附录 B 的 B.3。

3.2.2 低电压保护

1) 启动电压值。

$$U_{opm.gj} = 0.85pu \quad (26)$$

2) 时间整定系数。

按照前文对改进反时限过电流保护动作时间的整定, 发生三相短路时能够在 0~0.2s 内切除, 将低电压保护的启动动作时间设为 0.2s, 再依次按阶梯式整定与之配合保护的启动时间, 能最大程度地保证低电压保护动作的选择性。

以图 1 中系统级微电网为例, 附录 B 的 B4 给出了整个系统各保护的整定顺序及改进后的离网微电网保护的启动时间示意图, 如图 B1 所示。

3.3 保护实现方案

整个保护实现方案的动作流程如图 9 所示, 详细动作流程见附录 B 的 B.5, 场景示例见附录 B 的 B.6。

4 算例分析及仿真验证

在 PSCAD 中搭建如图 1 所示的含 IIDER 的微电网仿真模型, 微电网的电压等级为 10kV, 频率为 50Hz, 经 10kV/110kV 升压变压器连接到大电网。分布式电源均采用具有低电压穿越能力的 PQ 控制

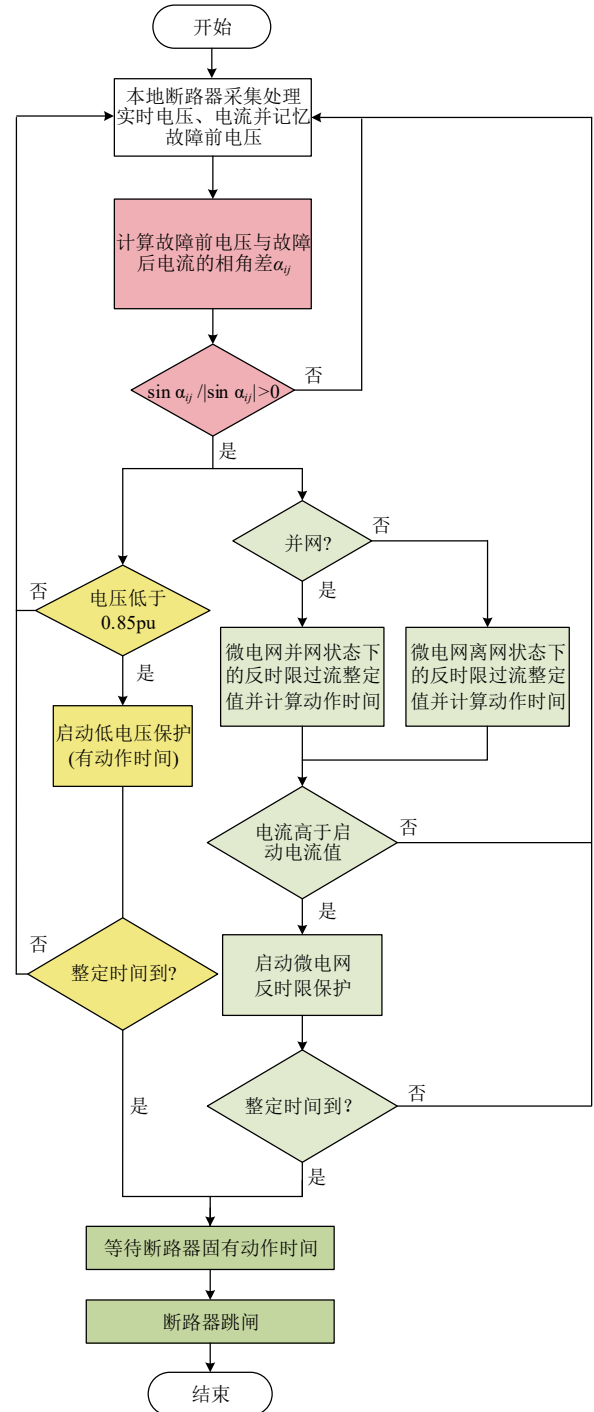


图9 改进的微电网保护方法流程图

Fig. 9 Flow chart of the improved microgrid protection scheme

策略,其中 IIDER1-IIDER3 的容量均为 3MW,最大故障电流为额定电流的 1.2 倍。联络馈线的长度均为 2km,负荷馈线的长度均为 0.2km,分布式电源馈线的长度均为 0.1km,线路阻抗 $Z_l=(0.125+j0.405)\Omega/\text{km}$ 。各负荷容量均为 3MV·A,功率因数为 0.85。设 $\Delta t=0.2\text{s}$, $t_b=0.04\text{s}$ 。当微电网由并网运行转为离网运行时,断开 PCC 点(A₁)和负荷 L₁。负荷馈线上的故障点设在保护 A₂、B₂、C₂、D₂ 后线路 200m 处,分布式电源馈线上的故障点设在保护 B₄、C₃、D₃ 后线路 50m 处,联络馈线上的故障点分别设在距离保护 A₃、A₄、B₃ 线路 1800m 处和距离保护 B₁、C₁、D₁ 线路 1800m 处。

根据本文所述微电网保护整定方案对并网状态及离网状态下的微电网保护进行整定,各整定参数如附录 A 表 A2、A3、A4 所示。利用 PSCAD 搭建微电网保护动作逻辑模块并设置启动电流和时间常数,对整个系统的保护进行仿真。分别在不同故障点设置不同类型的故障,记录各断路器采集到的原始数据和实际动作情况。

1) 并网状态。

分别在分布式电源馈线、负荷馈线、联络馈线上设置不同类型的故障,仿真得到各保护的動作情况如附录 A 表 A5、A6 和表 2 所示。

表 2 并网状态下联络馈线距离保护安装处 1800m 处故障保护的動作情况

Table 2 Protective action of the contact feeder for faults at a distance of 1800m from the protective installation under grid-connected state

保护位置	故障电流/kA	故障电压/kV	角度 $\alpha_{ij}/(^{\circ})$	故障类型	動作时间/s
C1	0.203	0.185	-255.320	三	0.228
	0.194	3.042	-230.279	两	0.700*
B3	2.677	2.228	72.485	三	0.208
	1.320	4.073	67.535	两	0.300*
B1	0.393	0.363	-252.302	三	0.193
	0.387	3.100	-227.773	两	0.500*
A3	4.228	3.614	75.664	三	0.213
	2.008	4.723	69.494	两	0.500*
A4	5.687	2.918	-281.990	三	0.227
	2.807	4.365	75.496	两	0.300*
D1	0.204	0.133	-251.670	三	0.229
	0.201	2.983	-226.071	两	0.700*

注:表 2、3 中動作时间*表示由低电压保护動作于跳闸。

在附录 A 表 A5、A6 和表 2 中记录了微电网在并网状态下,分布式电源馈线 50m 处、负荷馈线 200m 处、联络馈线距离保护安装处 1800m 处发生三相短路或两相短路故障时,各保护的動作情况。发生三相短路时,在分布式电源馈线和联络馈线的保护動作时间均小于 0.01s,在联络馈线距离保护安

装处 1800m 处发生三相短路動作时间约为 0.2s。发生两相短路故障时,在分布式电源馈线和联络馈线的保护動作时间仍小于 0.01s,而联络馈线上動作时间为低电压保护的跳闸时间,说明此时低电压保护的動作时间更快。对仅配置有改进反时限过电流保护的并网微电网系统进行仿真,发现两相短路时保护 B₃、B₁、A₃、A₄ 的動作时间小于 2s,此时的短路电流较小,但改进反时限过电流保护仍可以在 2s 内動作;而保护 C₁、D₁ 的動作时间长达 4~6s,是由于分布式电源提供的短路电流较小,且测量阻抗中的负荷阻抗和其他支路阻抗较大,导致動作时间进一步增大。

2) 离网状态下(断开 PCC 点)。

分别在分布式电源馈线、负荷馈线、联络馈线上设置不同类型的故障,仿真得到各保护的動作情况如附录 A 的表 A7、A8 和表 3 所示。

表 3 离网状态下联络馈线距离保护安装处 1800m 处故障保护的動作情况

Table 3 Protective action of the contact feeder for faults at a distance of 1800m from the protective installation under islanded state

保护位置	故障电流/kA	故障电压/kV	角度 $\alpha_{ij}/(^{\circ})$	故障类型	動作时间/s
C1	0.204	0.174	-325.530	三	0.223
	0.099	3.451	-325.575	两	0.700*
B3	0.393	0.336	-324.214	三	0.233
	0.187	3.493	-324.184	两	0.300*
B1	0.396	0.338	-324.165	三	0.209
	0.188	3.492	-324.341	两	0.500*
A3	0.202	0.172	-324.988	三	0.216
	0.096	3.449	-324.957	两	0.500*
A4	0.385	0.198	-323.076	三	0.221
	0.181	3.427	-323.587	两	0.300*
D1	0.205	0.105	-325.904	三	0.209
	0.102	3.403	-325.946	两	0.700*

由附录 A 的表 A7、A8 和表 3 可知,当三相短路或两相短路故障发生在分布式电源馈线 50m 处或负荷馈线 200m 处时,保护会快速切除,動作时间在 0.1s 左右,相较并网状态下的動作时间长,原因是离网微电网中短路电流较小;由表 3 可得,当联络馈线距离保护安装处 1800m 处发生三相短路时,保护的動作时间约为 0.2s,而当该处发生两相短路时,均由电压角度保护对故障进行切除。对仅配置有改进反时限电流保护的离网微电网系统进行仿真,发现此时的短路电流较小,达不到电流启动值或能达到启动电流值但反时限動作时间长达 20s。而断路器能够检测到电压低于 0.85pu 且 $(\sin \alpha_{ij}/|\sin \alpha_{ij}|) > 0$,启动低电压保护并等待一定时间后,由低电压保护動作。

从以上仿真结果可以看出,本文所提微电网保护方法综合利用了电压、电流、角度等故障特征,在并网状态和离网状态下,各处的保护均能够正确动作,速动性较好。

通过引入相角差,对故障方向进行判断,引入测量阻抗,对区内故障进行加速,再通过时间配合关系的整定,保证了保护的选择性;通过与低电压保护相配合,能够保证故障电流较小或达不到启动电流值时的动作时间,保证了保护的速动性;通过对启动电流和时间配合关系的整定,能够保证在微电网并/离网模式下任何故障位置发生任何类型的短路故障时,断路器均以改进反时限过电流保护和低电压保护中的较小动作时间正确动作,保证了保护的灵敏性和可靠性。该保护方案满足微电网保护的性要求,且通过本地信息量,不需要安装通信设备,经济性好。

5 结论

本文提出一种适用高比例构网型 IIDERS 接入的微电网并/离网保护方法,该方法利用故障前电压与故障后电流的相角差实现对故障方向的判断,利用测量阻抗对区内故障进行加速,综合利用故障时的电压电流特征实现了微电网并/离网模式下故障的快速有选择性切除,所得结论如下:

1) 运用故障等值网络对微电网在并/离网状态下不同位置故障时各线路的电压和电流相角进行分析,得出可基于故障前电压和故障电流之间的相角差来识别故障方向的结论。

2) 在反时限动作方程中引入了综合相角差和测量阻抗的区内故障加速因子,解决了传统电流保护在微电网中应用时误动及越靠近电源侧动作时间越长的问題。提出以相角差判据为辅助的微电网低电压保护,克服了在离网状态下两相故障时电流保护不能启动而存在动作盲区的问题。

3) 对所提出保护方案的参数整定过程及时间配合逻辑进行了详细的论证,通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证了所提保护方案可适应微电网并/离网运行模式,满足速动性、可靠性、选择性及灵敏性的要求,方法的实现基于就地信息量,不需要安装通信设备,经济性好。

在本文所构造判据中,用到了测量阻抗来加速区内故障时的保护动作时间,暂未考虑过渡电阻的影响,后续将研究保护在带过渡电阻故障情况下的适应性。

附录见本刊网络版 (<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 王新宝,葛景,韩连山,等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179. WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179(in Chinese).
- [2] 王成山,李鹏,于浩. 智能配电网的新形态及其灵活性特征分析与应用[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 13-21. WANG Chengshan, LI Peng, YU Hao. Development and characteristic analysis of flexibility in smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 13-21(in Chinese).
- [3] 王成山,周越. 微电网示范工程综述[J]. 供用电, 2015(1): 16-21. WANG Chengshan, ZHOU Yue. Overview of micro-grid demonstration project[J]. Distribution & Utilization, 2015(1): 16-21(in Chinese).
- [4] 李天友,徐丙垠. 国际视野下现代配用电若干问题的探讨[J]. 供用电, 2024, 41(8): 141-145. LI Tianyou, XU Bingyin. Exploration of some issues of modern power distribution from international perspective[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(8): 141-145(in Chinese).
- [5] 国家发展改革委,国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知[EB/OL]. (2022-01-29). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm.
- [6] 陈曦,付文龙,张海荣,等. 考虑新能源发电不确定性的含微电网群共享储能优化调度[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 219-228. CHEN Xi, FU Wenlong, ZHANG Hairong, et al. Optimal Dispatching Strategy of Shared Energy Storage With Multi-microgrid Considering Uncertainty of New Energy Generation[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 219-228(in Chinese).
- [7] 孙永辉,孟雲帆,葛磊蛟,等. 人工智能赋能微电网运行优化的应用及展望[J]. 高电压技术, 2023, 48(6): 2239-2252. SUN Yonghui, MENG Yunfan, GE Leijiao, et al. Application and prospect of microgrid operation optimization enabled by artificial intelligence[J]. High Voltage Engineering, 2023, 48(6): 2239-2252(in Chinese).
- [8] 周永荣,王思皓,马兆兴,等. 基于故障距离的微电网系统线路保护方法分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(5): 67-73. ZHOU Yongrong, WANG Sihao, MA Zhaoxing, et al. Line protection method analysis for microgrid system based on fault distance[J]. Smart Power, 2024, 52(5): 67-73(in Chinese).
- [9] 张尔佳,余墨多,黄文焘,等. 谐波电流注入式微电网主动保护方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(23): 172-179. ZHANG Erjia, YU Moduo, HUANG Wentao, et al. Active protection method for microgrids based on harmonic current injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 172-179(in Chinese).
- [10] 曹金铭,范开俊,徐丙垠,等. 基于容量边界值的高比例逆变型分布式电源配电网三级保护适用性分析[J]. 电网技术, 2024, 48(8): 3438-3448. CAO Jinming, FAN Kaijun, XU Bingyin, et al. Applicability analysis of capacity boundary value based three-level protection in distribution networks containing high percentage of inverter interfaced distributed energy resources[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3438-3448(in Chinese).
- [11] 景柳铭,王一博,赵通,等. 考虑光伏低电压穿越特性的交流微电网保护方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(5): 54-60. JING Liuming, WANG Yibo, ZHAO Tong, et al. AC microgrid protection method considering photovoltaic low voltage ride through characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5): 54-60(in Chinese).
- [12] 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): 110-120(in Chinese).
- [13] 张世师, 朱亚军, 唐成虹, 等. 基于 GOOSE 通信技术的微电网故障定位及隔离[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 179-183. ZHANG Shishuai, ZHU Yajun, TANG Chenghong, et al. Fault location and isolation of microgrid based on GOOSE communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 179-183(in Chinese).
- [14] 黄文焘, 邵能灵, 刘剑青, 等. 微电网多层次协同反时限保护方案[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 623-633. HUANG Wentao, TAI Nengling, LIU Jianqing, et al. Multi-layer collaborative inverse-time protection schemes for microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 623-633(in Chinese).
- [15] 周石金, 何晋, 杨凡, 等. 基于改进电流相差保护的微电网保护方案[J]. 电测与仪表, 2023, 60(9): 132-137. ZHOU Shijin, HE Jin, YANG Fan, et al. Micro-grid protection scheme based on improved current phase difference protection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(9): 132-137(in Chinese).
- [16] WANG Bin, JING Liuming. A protection method for inverter-based microgrid using current-only polarity comparison[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(3): 446-453.
- [17] FAN Lingling. Control and dynamics in power systems and microgrids[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [18] 李永丽, 金强, 李博通, 等. 低电压加速反时限过电流保护在微电网中的应用[J]. 天津大学学报, 2011, 44(11): 955-960. LI Yongli, JIN Qiang, LI Botong, et al. Application of inverse-time overcurrent protection based on low voltage acceleration in micro-grid[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(11): 955-960(in Chinese).
- [19] 曹岳, 季亮, 常满, 等. 基于复合故障补偿因子的微电网反时限电流保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 133-140. CAO Zhe, JI Liang, CHANG Xiao, et al. Inverse-time current protection method of a microgrid based on a composite fault compensation factor[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 133-140(in Chinese).
- [20] 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): 3389-3401. FANG Chongkai, MU Longhua, OU Rui, et al. Research on control-protection coordination based on injection protect scheme of microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3389-3401(in Chinese).
- [21] EL SAYED W T, AZZOUEZ M A, ZEINELDIN H H, et al. A harmonic time-current-voltage directional relay for optimal protection coordination of inverter-based islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 1904-1917.
- [22] 彭放, 高厚磊, 郭一飞, 等. 构网型逆变电源故障穿越控制策略及其对保护影响的研究综述[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3673-3685. PENG Fang, GAO Houlei, GUO Yifei, et al. A review of fault ride-through control strategies of grid-forming inverter-based resources and the influence on protection[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3673-3685(in Chinese).
- [23] 许洁翊, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586-3594. XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3594(in Chinese).
- [24] DEEPAK D, BUCHNER M, RUDION K, et al. Short-circuit currents characterization for future converter-based power systems[C]/27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023). Rome, Italy: IET, 2023: 2175-2179.
- [25] 秦世耀, 齐琛, 李少林, 等. 电压源型构网风电机研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1314-1333. QIN Shiyao, QI Chen, LI Shaolin, et al. Review of the voltage-source grid forming wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1314-1333(in Chinese).
- [26] LIN Yashen, ETO J H, JOHNSON B B, et al. Research roadmap on grid-forming inverters[R]. Golden: National Renewable Energy Lab, 2020.
- [27] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 光伏发电系统接入配电网技术规定: GB/T 29319—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [28] 张润坤, 王宝华. 含低电压穿越型光伏电源配电网自适应正序电流速断保护[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 137-142. ZHANG Runkun, WANG Baohua. An adaptive positive-sequence current instantaneous trip protection for distribution network with PV[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 137-142(in Chinese).
- [29] 孙玲玲, 王宁, 贾清泉, 等. 计及分布式光伏发电低电压穿越能力的主动配电网保护方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 79-86. SUN Lingling, WANG Ning, JIA Qingquan, et al. Protection method of active distribution network considering low voltage ride-through of distributed PV generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 79-86(in Chinese).
- [30] 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(in Chinese).
- [31] 吴攀, 黄文焘, 邵能灵, 等. 基于功率互济的柔性互联多微网孤岛运行多层协调控制策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3101-3111. WU Pan, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Multi-layer coordinated control strategy for islanded flexible interconnected multiple microgrids based on mutual power support[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3101-3111(in Chinese).
- [32] 司新跃, 陈青, 高湛军, 等. 基于电流相角突变方向的有源配电网保护[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 97-103. SI Xinyue, CHEN Qing, GAO Zhanjun, et al. Protection scheme for active distribution system based on directions of current phase angle variation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 97-103(in Chinese).
- [33] 刘玉娟, 卫志农, 孙国强, 等. 低阻抗加速反时限过电流保护[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3424-3431. LIU Yujuan, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Low impedance acceleration inverse-time over-current protection[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3424-3431(in Chinese).
- [34] 黄景光, 赵珩, 李浙栋, 等. 基于动作时限曲线拟合思想的含 DG 型配电网后备保护新方法[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 2199-2206. HUANG Jingguang, ZHAO Heng, LI Zhedong, et al. New method for backup protection in distribution networks with DG based on idea of action time limit curve fitting[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2199-2206(in Chinese).
- [35] HAMANAH W M, HOSSAIN M I, SHAFIULLAH M, et al. AC microgrid protection schemes: a comprehensive review[J]. IEEE Access, 2023, 11: 76842-76868.



曹金铭

在线出版日期: 2025-03-24。

收稿日期: 2024-10-18。

作者简介:

曹金铭(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网保护与自动化技术及应用, E-mail: jinming2000@163.com;

范开俊(1983), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为配电网保护与自动化, E-mail: cathrine_fan@126.com。

(责任编辑 李健一)

附录 A

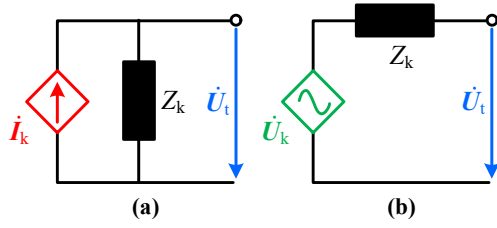


图 A1 C-CS(a), C-VS(b)的等效模型

Fig.A1. Equivalent models for C-CS (a), C-VS (b)

表 A1 构网型 IIDER 故障穿越特性

Table A1 Fault ride-through characteristics of GFM IIDER

电压跌落系数 θ	电流幅值/pu	电流相角/(°)	脱网时间/s	等效模型
0.5215~0.9	1.12~1.2	0~17	1.26~2	C-VS
0.4333~0.5215	1.2	17~90	1.08~1.26	C-CS
0.2~0.4333	1.2	90	0.625~1.08	恒流源
0~0.2	1.2	90	0~0.625	恒流源

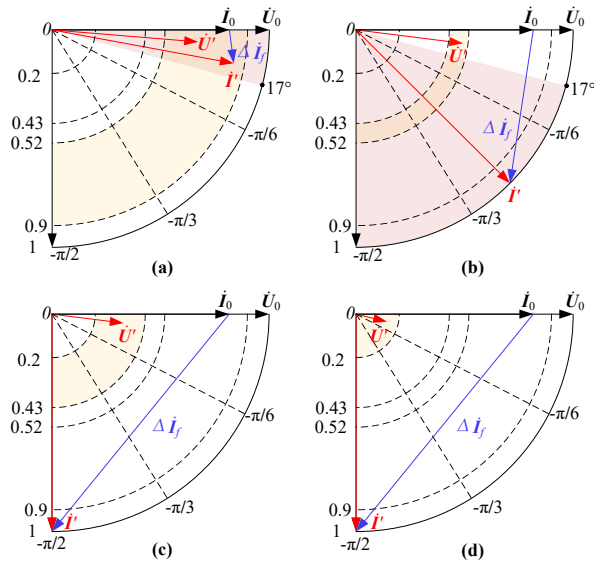


图 A2 构网型 IIDER 输出电压、电流相位图

Fig. A2 GFM IIDER output voltage and current phase diagram

图 A2 中, $\dot{U}_0$ 、 $\dot{I}_0$ 为并网点故障前正常电压、电流; $\dot{U}'$ 、 $\dot{I}'$ 为并网点故障后电压、电流; $\Delta \dot{I}_f$ 为电流故障分量。

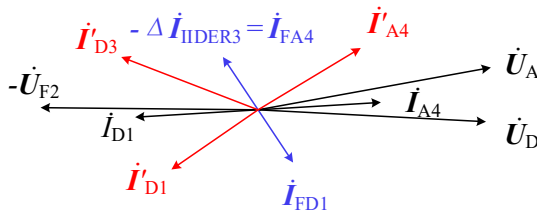


图 A3 D 单元微电网并网运行下 F2 点故障相角图

Fig. A3 Grid-connected D unit microgrid F2 fault phase angle diagram

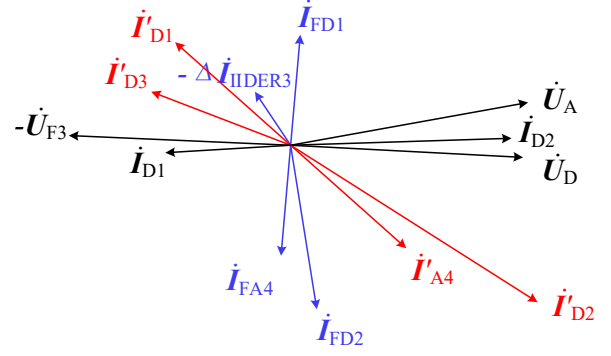


图 A4 D 单元微电网并网运行下 F3 点故障相角图

Fig. A4 Grid-connected D unit microgrid F3 fault phase angle diagram

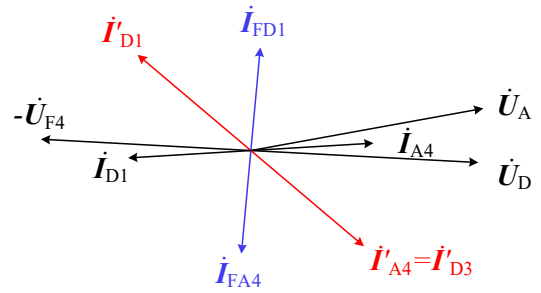


图 A5 D 单元微电网并网运行下 F4 点故障相角图

Fig. A5 Grid-connected D unit microgrid F4 fault phase angle diagram

并网运行状态下 D 单元微电网的配电网侧 F2 点发生故障时, 保护 D₁、保护 A₄ 和保护 D₃ 处故障前电压与故障后电流相角的关系为

$$\begin{cases} \Delta_{D1} = \arg(\dot{U}_D / \dot{I}'_{D1}) > 0^\circ \\ \Delta_{A4} = \arg(\dot{U}_A / \dot{I}'_{A4}) < 0^\circ \\ \Delta_{D3} = \arg(\dot{U}_D / \dot{I}'_{D3}) < 0^\circ \end{cases} \quad (A1)$$

并网运行状态下 D 单元微电网的负荷馈线 F3 点发生故障时, 保护 D₂、保护 A₄、保护 D₁ 和保护 D₃ 处故障前电压与故障后电流相角的关系为

$$\begin{cases} \Delta_{D2} = \arg(\dot{U}_D / \dot{I}'_{D2}) > 0^\circ \\ \Delta_{A4} = \arg(\dot{U}_A / \dot{I}'_{A4}) > 0^\circ \\ \Delta_{D1} = \arg(\dot{U}_D / \dot{I}'_{D1}) < 0^\circ \\ \Delta_{D3} = \arg(\dot{U}_D / \dot{I}'_{D3}) < 0^\circ \end{cases} \quad (A2)$$

并网运行状态下 D 单元微电网的分布式电源馈线 F4 点发生故障时, 保护 D₃、保护 A₄ 和保护 D₁ 处故障前电压与故障后电流相角的关系为

$$\begin{cases} \Delta_{D3} = \arg(\dot{U}_D / \dot{I}'_{D3}) > 0^\circ \\ \Delta_{A4} = \arg(\dot{U}_A / \dot{I}'_{A4}) > 0^\circ \\ \Delta_{D1} = \arg(\dot{U}_D / \dot{I}'_{D1}) < 0^\circ \end{cases} \quad (A3)$$

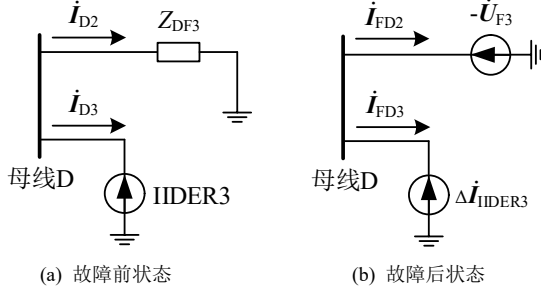


图 A6 D 单元微电网独立运行下 F3 点故障等值网络
Fig. A6 Stand-alone D unit microgrid F3 fault equivalent network

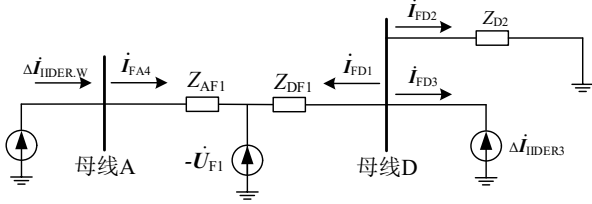


图 A7 D 单元微电网非独立运行下 F1 点故障后等值网络
Fig. A7 Non-standalone D unit microgrid F1 fault equivalent network

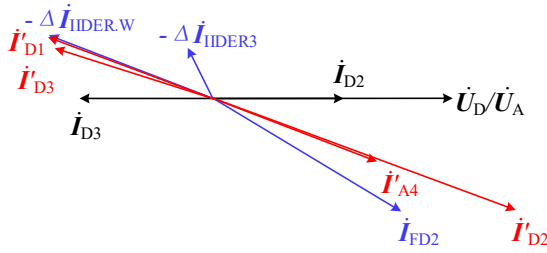


图 A8 D 单元微电网非独立运行下 F3 故障相角图
Fig. A8 Non-standalone D unit microgrid F3 fault phase angle diagram

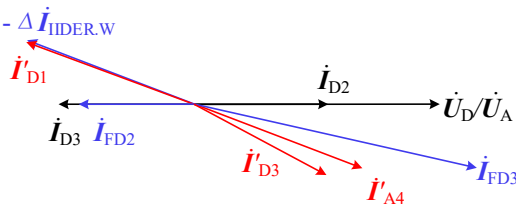


图 A9 D 单元微电网非独立运行下 F4 故障相角图
Fig. A9 Non-standalone D unit microgrid F4 fault phase angle diagram

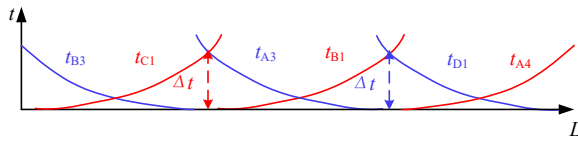


图 A10 并网状态下改进反时限过电流保护动作时间曲线
Fig. A10 Action time curve of inverse-time overcurrent protection in grid-connected state

非独立运行状态下 D 单元微电网的负荷馈线 F3 点发生故障时, 保护 D₂、保护 A₄、保护 D₁ 和保

护 D₃ 处故障前电压与故障后电流相角的关系:

$$\begin{cases} \Delta_{D2} = \arg(\dot{U}_D / \dot{I}'_{D2}) > 0^\circ \\ \Delta_{A4} = \arg(\dot{U}_A / \dot{I}'_{A4}) > 0^\circ \\ \Delta_{D1} = \arg(\dot{U}_D / \dot{I}'_{D1}) < 0^\circ \\ \Delta_{D3} = \arg(\dot{U}_D / \dot{I}'_{D3}) < 0^\circ \end{cases} \quad (A4)$$

非独立运行状态下 D 单元微电网的分布式电源馈线 F4 点发生故障时, 保护 A₄、保护 D₃ 和保护 D₁ 处故障前电压与故障后电流相角的关系为

$$\begin{cases} \Delta_{A4} = \arg(\dot{U}_A / \dot{I}'_{A4}) > 0^\circ \\ \Delta_{D1} = \arg(\dot{U}_D / \dot{I}'_{D1}) > 0^\circ \\ \Delta_{D3} = \arg(\dot{U}_D / \dot{I}'_{D3}) < 0^\circ \end{cases} \quad (A5)$$

表 A2 并网状态下改进反时限过电流保护整定参数
Table A2 Settings of protection parameters in grid-connected state

保护位置	被保护线路的类型	启动电流/kA	时间常数
C3	分布式电源馈线	0	0.001
B4	分布式电源馈线	0	0.001
D3	分布式电源馈线	0	0.001
C2	负荷馈线	0.468	0.001
B2	负荷馈线	0.468	0.001
D2	负荷馈线	0.468	0.001
A2	负荷馈线	0.468	0.001
C1	联络馈线	0.104	1.444
B3	联络馈线	0.468	6.966
B1	联络馈线	0.208	1.125
A3	联络馈线	0.936	5.33
A4	联络馈线	0.468	30
D1	联络馈线	0.104	2.055

表 A3 离网状态下改进反时限过电流保护整定参数
Table A3 Settings of protection parameters in islanded state

保护位置	被保护线路的类型	启动电流/kA	时间常数
C3	分布式电源馈线	0	0.001
B4	分布式电源馈线	0	0.001
D3	分布式电源馈线	0	0.001
C2	负荷馈线	0.209	0.001
B2	负荷馈线	0.209	0.001
D2	负荷馈线	0.209	0.001
A2	负荷馈线	0.209	0.001
C1	联络馈线	0.104	1.444
B3	联络馈线	0.208	1.366
B1	联络馈线	0.208	1.125
A3	联络馈线	0.104	1.33
A4	联络馈线	0.208	2.059
D1	联络馈线	0.104	2.055

表 A4 低电压保护整定参数
Table A4 Settings of low voltage protection parameters

保护位置	被保护线路的类型	启动电压/pu	低电压保护动作时间/s
A4	联络馈线	0.85	0.300
D1	联络馈线	0.85	0.700
B1	联络馈线	0.85	0.500
A3	联络馈线	0.85	0.500
C1	联络馈线	0.85	0.700
B3	联络馈线	0.85	0.300

表 A5 并网状态下分布式电源馈线 50m 处故障保护动作情况
Table A5 Protection action for faults at 50m of IIDER feeder under grid-connected state

保护位置	故障电流/kA	角度 $\alpha_{ij}/(^{\circ})$	故障类型	动作时间/s
C3	2.649	70.803	三	0.004
	1.232	67.953	两	0.009
B4	4.326	-286.282	三	0.005
	2.071	72.122	两	0.008
D3	5.568	-283.144	三	0.003
	2.682	75.503	两	0.007

表 A6 并网状态下负荷馈线 200m 处故障保护的动作情况
Table A6 Protection action for faults at 200m of load feeder under grid-connected state

保护位置	故障电流/kA	角度 $\alpha_{ij}/(^{\circ})$	故障类型	动作时间/s
C2	2.746	-286.993	三	0.004
	1.436	70.610	两	0.007
B2	4.299	-285.071	三	0.003
	2.214	73.354	两	0.006
D2	5.414	-282.482	三	0.003
	2.759	-283.905	两	0.006
A2	9.867	-277.378	三	0.002
	4.983	-278.135	两	0.006

表 A7 离网状态下分布式电源馈线 50m 处故障保护动作情况
Table A7 Protection action for faults at 50m of IIDER feeder under islanded state

保护位置	故障电流/kA	角度 $\alpha_{ij}/(^{\circ})$	故障类型	动作时间/s
C3	0.393	-324.262	三	0.009
	0.086	-321.238	两	0.012
B4	0.405	-325.432	三	0.003
	0.094	-324.719	两	0.011
D3	0.385	-323.279	三	0.007
	0.082	-321.634	两	0.012

表 A8 离网状态下负荷馈线 200m 处故障保护的动作情况
Table A8 Protection action for faults at 200m of load feeder under islanded state

保护位置	故障电流/kA	角度 $\alpha_{ij}/(^{\circ})$	故障类型	动作时间/s
C2	0.599	-324.773	三	0.004
	0.390	-325.337	两	0.008
B2	0.611	-325.469	三	0.003
	0.397	-325.874	两	0.008
D2	0.591	-324.178	三	0.003
	0.385	-324.912	两	0.008
A2	0.539	-324.736	三	0.004
	0.383	-325.837	两	0.008

附录 B

B.1 分布式电源馈线的保护参数整定

无论在并网还是离网模式下，正常运行时，分布式电源馈线的电流方向由线路指向母线；分布式电源馈线上发生故障时，由系统和其他分布式电源向该故障点提供短路电流，电流方向由母线指向线路，保护安装处检测到的电流方向与正常状态相反，因此可以根据保护安装处故障前后的相角特性

区分故障。为确保分布式电源馈线故障时，分布式电源馈线出口的断路器能可靠且快速的动作，分布式电源馈线的启动电流可选为 0。

当分布式电源馈线发生故障时，线路出口保护不需要等待，动作时限可取保护动作最小值， $t_{B4} = t_{C3} = t_{D3} = t_b$ ， t_b 为断路器的出厂固有动作时间。

B.2 负荷馈线的保护参数整定

对负荷馈线来说，正常电流和故障电流的电流方向不变，电流大小发生变化，其启动电流可按照传统配电网的启动电流整定方程进行整定：

$$I_{\text{opm},ij} = K_{\text{rel}} K_{\text{ss}} / K_{\text{re}} \cdot I_{ij,\text{max}} \quad (\text{B1})$$

式中： K_{rel} 表示可靠系数，取值范围为 1.25~1.5； K_{ss} 表示自启动系数，为最大启动电流与负荷电流的比值，在并网状态下，自启动系数和无源配电网类似，取值应大于 1，在离网状态下，由于电力电子器件快速灵敏的调控，最大启动电流与负荷电流的比值近似取 1； K_{re} 表示断路器返回系数，取值应小于 1； $I_{ij,\text{max}}$ 表示馈线 ij 正常运行时的最大负荷电流。

当负荷馈线发生故障时，线路出口保护不需要等待，动作时限取保护动作最小值，即断路器的出厂固有动作时间 $t_{A2} = t_{B2} = t_{C2} = t_{D2} = t_b$ 。

B.3 离网状态下改进反时限过电流保护的整定

1) 启动电流值。

离网运行下发生故障时，产生的故障电流较小，特别是两相短路电流更小，因此启动电流需要根据实际场景整定。在微电网脱离大电网后，通常会通过甩掉一部分负荷的方式，继续保持微电网的供电平衡，因此本文的分析是基于微电网内分布式电源和负荷就近供电，没有远距离输电的情况。

离网状态下的微电网正常运行时的电流失去方向性，内部的各微电网单元能够独立运行，发生故障后，故障电流经联络馈线流向故障点。在这种情况下，正常状态下联络馈线中的电流很小，发生故障时联络线两侧的电流与并网时联络线上靠近分布式电源侧保护分析类似。

离网微电网发生三相短路时，故障分析过程与 3.2.3 节联络馈线远离系统侧①、②分析类似，区别在于所连接的可能不再是单元微电网，但仍可以根据所连接的微电网源荷比，采用正文中的公式(23)进行整定。

2) 时间整定系数。

在离网微电网模式下，分布式电源的位置和数量是不确定的，既无法认定由母线指向线路的方向为线路的正方向，也无法认定由某一分布式电源指向线路的方向为线路的正方向。在图 1 中，F1 点发

生故障，根据选择性要求，保护的动作为时间应为 $t_{A4} < t_{B1} < t_{C1}$ ；F6 点发生故障，根据选择性要求，保护的动作为时间应为 $t_{B3} < t_{A3} < t_{D1}$ 。

对于保护 A₄，整定后的电流为 $I_{opl.A4}$ ，根据选择性要求，在 D₂ 线路出口发生最严重故障时，保护 A₄ 的动作时间比保护 D₂ 高 Δt 。由于参数整定后的保护 D₂ 瞬间工作，那么，保护 A₄ 的动作时刻 $t_{A4} = \Delta t$ ，代入正文中的公式(15)，可以得到保护 A₄ 的时间常数，如式(B2)所示。

$$t_{TDSL.A1} = \frac{[(I_{f.D2.max} / I_{opl.A4}) - 1]\Delta t}{0.14 \cdot M'} \quad (B2)$$

同理可对其他保护进行时间参数的整定。

B.4 微电网的整定

整个系统的整定顺序如下：

①所有负荷馈线保护和分布式电源馈线保护均按照最小动作时间整定。

②联络馈线(第一组)按照反时限上下级动作时间整定：D₂-A₄-B₁-C₁。

③联络馈线(第二组)按照反时限上下级动作时间整定：C₂-B₃-A₃-D₁。

④所有联络馈线的低电压保护按照阶梯式动作时间整定。

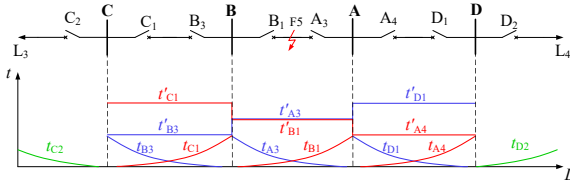


图 B1 改进的离网微电网保护动作时间示意图

Fig. B1 Improved islanded microgrid protection action time diagram

改进后的离网微电网保护的动作为时间如图 B1 所示。图 B1 所示为将图 1 中 PCC 点(A₁)断开，以 A 母线为轴，由联络馈线和负荷馈线组成的“拉直”的离网微电网，在位置一时间坐标轴中，红色线条表示联络馈线(第一组)的动作时间曲线，蓝色线条表示联络馈线(第二组)的动作时间曲线，绿色线条表示两条负荷馈线的动作时间曲线。 t_{ij} 表示以电流和角度构成的反时限过电流保护的动作为时间， t'_{ij} 表示以电压和角度构成的低电压保护的动作为时间。在本线路最末端发生故障时，改进的反时限过电流保护动作的时间通常为 0.2s，可将最末端电压保护动作时间设为 0.2s 或 0.3s，按照阶梯式原则依次整定前边的低电压保护动作时间。

B.5 保护实现方案的详细动作流程

1、本地断路器采集处理实时电气特征量并记

忆故障前的电压。

2、计算故障前电压与故障后电流的相角差 $\alpha_{ij} = \arg(\dot{U}_i / \dot{I}'_{ij})$ 。

3、若 $(\sin \alpha_{ij} / |\sin \alpha_{ij}|) > 0$ ，则进行步骤 4，否则跳转至步骤 1。

4、1) 若故障后电压低于 0.85pu，则启动低电压保护，按照整定好的阶梯式动作时间，等待整定时间到达，若整定时间到，则进入步骤 5，否则进入步骤 1；

2) ①若为并网状态，则选用微电网并网状态下的反时限过电流整定值并计算动作时间，进入步骤③；

②若为离网状态，则选用微电网离网状态下的反时限过电流整定值并计算动作时间，进入步骤③；

③若故障电流高于启动电流值，进入步骤④，否则进入步骤 1；

④启动微电网反时限过电流保护，等待动作时间到达，若整定时间到，则进入步骤 6，否则进入步骤 1。

5、等待断路器固有动作时间到达。

6、断路器跳闸。

B.6 保护实现方案场景示例

以图 1 中的 F5 点故障为例，对整个保护实现方案的动作为流程进行说明。首先故障电流分别由两侧分布式电源流向故障点，保护 C₁、B₁(第一组)和保护 D₁、A₃(第二组)均能检测到正向的故障电流达到相角差动作条件；当 F5 点发生三相故障时，短路电流值可能超过断路器 A₃、B₁、C₁、D₁ 的启动电流值，而故障点两侧的断路器 A₃、B₁ 动作时间在 0.2s 以内，断路器 C₁、D₁ 由于距离故障点较远，动作时间均大于 0.2s，因此将由 A₃、B₁ 迅速跳开隔离故障；当 F5 点发生两相故障时，此时的短路电流较小，故障测量阻抗较大，反时限过电流保护的动作为时间将失去速动性，微电网中大部分的保护安装处均能检测到低电压，而只有保护 C₁、B₁、D₁、A₃ 才能满足相角差的动作为条件，经过时间整定的低电压保护动作时间 A₃、B₁ 会先于 C₁、D₁ 动作，此时就构成了由断路器 A₃、B₁ 低电压判据动作的条件；若同时达到了低电压保护和反时限过电流保护的动作为条件，则任意一个整定时间到达后(较小的动作为时间)再等待断路器固有动作时间后跳闸。由此分析可得，在 F5 点无论发生任何类型故障时，均由 F5 点两侧的断路器 A₃、B₁ 跳闸。