

弱联络海岛微电网群故障检测与定位方法

向真¹, 谈赢杰², 舒放¹, 欧仲曦¹, 黄珊¹

(1. 广东电网有限责任公司珠海供电局, 广东 珠海 519000; 2. 南方电网科学研究院, 广州 510663)

摘要: 弱联络海岛微电网群缺乏陆地电网支撑, 系统潮流动态不定、故障电流水平低, 导致保护设计困难。为此, 利用节点电压信息构造虚拟漏电流揭示了正常扰动、区内故障、区外故障工况下线路两端节点的虚拟漏电流特性, 基于此建立了故障区段检测判据与故障距离计算模型, 提出了适应弱联络场景的海岛微电网群故障检测与定位方法。最后, 仿真结果表明, 不同故障电阻、故障位置、故障类型工况下所提方法均能准确判别故障线路与故障相, 微电网内主干线路和微电网间互联线路的故障定位误差均小于5%。

关键词: 弱联络海岛; 微电网群; 虚拟漏电流; 故障区段判别; 故障定位

Fault Detection and Location Methods for Weakly Connected Island Microgrids Group

XIANG Zhen¹, TAN Yingjie², SHU Fang¹, OU Zhongxi¹, HUANG Shan¹

(1. Zhuhai Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Weakly connected microgrid lacks terrestrial grid support, resulting in unstable system power flow dynamics and low fault current levels, and leads to complicate protection design. To address this, virtual leakage current is constructed using node voltage information to reveal the characteristics of line-end node virtual leakage current under normal disturbances, internal fault and external fault conditions. Based on this, a fault section detection criterion and fault distance calculation model are established, a fault detection and location method suitable for weakly connected microgrid is proposed. Finally, simulation results demonstrate that the proposed method accurately identifies faulted lines and phases under varying fault resistances, locations, and types, with fault location errors between main grid lines and microgrids interconnected lines remaining below 5%.

Key words: weakly connected island; microgrids group; virtual residual current; fault section identification; fault location

引言

考虑海岛环境下风电、光伏等新能源出力波动大、不确定性强等特点, 将相邻海岛微电网互联构成微电网群, 实现子微电网之间的协同运行与能量互济, 是远洋海岛群持续可靠供电的重要途径^[1-2]。然而海岛环境恶劣, 时常面临台风、海啸等极端天气挑战, 岛内地下电缆、岛间海底电缆故障频发。

而海岛微电网群远离大陆, 多采用孤岛运行模式, 缺乏大电网支撑, 系统故障承受能力弱。并且, 风电、光伏等逆变器接口型微源过流能力差, 系统潮流双向且故障电流水平较低^[3-5], 传统保护方法难以有效保护微电网群。

近年来, 国内外专家学者已提出多种微电网及微电网群保护方法。第一类是被动式保护, 主要基于短路故障或故障穿越控制响应引入的系统故障特性^[6-12]。文献[6-7]通过建立电压控制型、电流控制型微源的正序故障等效模型, 分析不同逆变型微源故障穿越控制响应特性对故障分量方向元件的影响, 基于此提出适应多类型微源接入的故障方向判据。文献[8]提出基于正序电流、电

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22B2096); 中国南方电网有限公司科技项目(030400KK52220004(GDKJXM20220179))。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (U22B2096); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd., (030400KK52220004 (GDKJXM20220179)).

流故障分量相位差特征的孤岛微电网保护方法,文献[9]提出基于线路两端正序电流故障分量波形形态特征的双端保护方法,文献[10]提出一种基于改进电流相位差的保护方法。上述方法利用故障分量可以消除故障前系统潮流方向不确定对保护性能的影响,但由于微源输出电流相位非线性时变特点,保护阈值选取困难,极端工况下可能发生误动。文献[11-12]提出的保护方案分别利用负荷阻抗和电压幅值随故障距离增大而增大的特点,结合反时限动作特性实现故障区段判别,但由于微电网系统规模小、供电半径短,这类保护的灵敏度较低。第二类是主动式保护,利用逆变型微源的高可控性,往系统中注入谐波、间谐波等非基频分量进行故障判别^[13-17]。文献[13-14]利用注入特定次谐波电流构造过流保护判据,通过谐波-时间反时限原理实现保护装置的选择性协调,但此类方法或难以适应网络拓扑结构的灵活变化,或无法快速检测线路末端高阻故障。文献[15]通过调整注入谐波的幅值和频率表征故障严重程度和位置,构造区内外故障的谐波分量特征差异,进行故障区段检测。文献[16]提出多微源特征频率协同注入的保护方法,可避免多支路分流作用削弱特征频率信号,文献[17]面向微电网接地故障工况,提出基于零序非工频特征注入的保护方法。具体方法对比如表1所示,总的来说,上述方法仍无法完全消除微源故障响应特性对保护性能的影响。

针对现有微电网故障保护方法存在的阈值依赖强、通信需求高、极端工况适应性差等问题,本文

提出基于节点电压构造虚拟漏电流的故障监测新方法。通过深入分析正常扰动、故障线路及非故障线路两端虚拟漏电流特性,构建以线路两端虚拟漏电流之和为核心的检测定位判据。本文的具体创新如下。

1) 提出基于节点电压基频信息的虚拟漏电流构造方法,避免传统方法对系统潮流和微源响应特性的依赖,有效消除外部因素干扰;

2) 建立虚拟漏电流故障特征分析体系,揭示不同工况下虚拟漏电流幅值与相位差异,为故障类型判别提供理论依据;

3) 本文提出基于虚拟漏电流的故障监测方法,设计相位差判据实现定位准确率超95%,故障检测时间<30 ms,单节点单次采样数据量仅256 bytes,通信带宽需求大幅降低,可实现多场景故障的快速精准定位。

1 海岛微电网群

如图1所示,海岛微电网群由多个微电网通过海缆互联构成,包括柴发、光伏、风电等分布式电源、储能单元、变压器、电力网络、恒阻抗负荷、柔性负荷等部分。微源可分为跟网型和构网型微源,其中跟网型微源源侧主要是光伏、风电等新能源,构网型微源源侧主要是储能,负责提供电压、频率支撑。为简化模型分析,微源模型中用恒压源代替直流侧。节点可分为连接分布式电源或储能单元的有源节点、仅连接主干线路的中间节点、负荷节点以及微电网互联节点。线路可以分为线路两端均连接节点的微网内部主干线路、连接分布式电源

表1 与现有保护方法的性能对比

Tab. 1 Performance comparison of existing microgrid protection methods

方法类别	故障检测时间/ms	定位准确率	需通信数据量	故障类型适应性
被动式	>150	文献[6-7] 依赖故障方向判定	依赖阈值匹配,需频繁更新参数	高阻接地故障下保护阈值失效
		文献[8-10] 基于故障分量		
		文献[11-12] 约85%		
主动式	80~120	文献[13] 线路末端灵敏度下降	需传输注入信号及全局状态数据,单节点数据 据传输量约1~2 kB/次	高阻故障下存在5%~ 10%的误判风险
		文献[14-15] 高阻故障定位准确率下降 至85%~90%		
		文献[16-17]		
本文方法	<30,响应速度提升 2~5倍	定位准确率达95%	单节点数据传输量约为256 B/次	检测灵敏度维持95%以上

或负荷的分支线路以及微电网间的互联线路。

每个微电网均配置有集中保护单元, 负责微电网内部运行控制与保护以及微电网间的协同优化调度, 收集本地电压电流互感器采集的电力数据与保护装置输出的相关控制指令, 可实现故障特征提取、故障区段判别、故障距离计算等功能, 并将故障保护结果发送至本地保护装置, 进行故障隔离与检修。

2 弱联络微电网群的虚拟漏电流特性分析

对于弱联络海岛微电网群, 由于系统供电半径小, 基频范围内微电网内部主干电缆可以用 RL 等效电路模拟。而弱联络微电网间互联海缆分布电容较大, 需要用 π 形等效电路模拟。基于此分别分析主干线路和互联线路两端节点的虚拟漏电流特性。

2.1 微电网内主干线路的节点虚拟漏电流特性

假设线路两端分别为有源节点和负荷节点, 不同工况下的基频等效电路如图 2 所示。 $\dot{V}_m$ 和 $\dot{V}_n$ 为线路两端节点电压; $\dot{V}_i (i=1, \dots, G)$, $\dot{V}_j (j=1, \dots, H)$ 分别为与节点 m 和 n 相邻的节点电压; $\dot{V}_f$ 为故障点电压; $\dot{I}_{DGm}$ 为微源输出电流; Z_{Ln} 为负荷阻抗; $Z_{mi} (i=1, \dots, G)$, $Z_{nj} (j=1, \dots, H)$ 为线路阻抗; Z_{mn} 和 l_{mn} 为主干线路阻抗和长度; Z_{mf} 、 Z_{nf} 、 l_{mf} 、 l_{nf} 为两端节点到故障点的线路阻抗和长度; R_f 为故障

电阻。

如图 2(a) 所示, 正常运行工况下线路两端的虚拟漏电流 $\Delta \dot{I}_{Re_m}$ 、 $\Delta \dot{I}_{Re_n}$ 为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{Re_m} = \sum_{i=1}^G (\dot{V}_m - \dot{V}_i) / Z_{mi} + \dot{I}_{DGm} = 0 \\ \Delta \dot{I}_{Re_n} = \sum_{j=1}^H (\dot{V}_n - \dot{V}_j) / Z_{nj} + \dot{V}_n / Z_{Ln} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

如图 2(b) 所示, 正常扰动工况下线路两端的虚拟漏电流为

$$\Delta \dot{I}_{Re_m} = (\dot{V}_m - \dot{V}_n) / Z_{mn}, \Delta \dot{I}_{Re_n} = (\dot{V}_n - \dot{V}_m) / Z_{mn} \quad (2)$$

如图 2(c) 所示, 区内故障条件下线路两端的虚拟漏电流为

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{Re_m} = \overbrace{(\dot{V}_m - \dot{V}_n) / Z_{mn}}^{i_{mn_cal}} - \overbrace{(\dot{V}_m - \dot{V}_f) / Z_{mf}}^{i_{mn_act}} \\ \Delta \dot{I}_{Re_n} = \overbrace{(\dot{V}_n - \dot{V}_m) / Z_{mn}}^{i_{nm_cal}} - \overbrace{(\dot{V}_n - \dot{V}_f) / Z_{nf}}^{i_{nm_act}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_{mn_cal} 、 i_{nm_cal} 和 i_{mn_act} 、 i_{nm_act} 分别为故障线路两端电流的计算值和实际值; $\Delta \dot{I}_{Re_m}$ 和 $\Delta \dot{I}_{Re_n}$ 均大于 0。随着 Z_{mf} 增大, i_{mn_act} 减小, i_{nm_act} 增大, 即 $\Delta \dot{I}_{Re_m}$ 减小而 $\Delta \dot{I}_{Re_n}$ 增大。

根据式 (3) 可得 $Z_{mf} \Delta \dot{I}_{Re_m} = Z_{nf} \Delta \dot{I}_{Re_n}$, 通过序域虚拟漏电流计算主干线路两端节点到故障点的故障距离, 如式 (4) 所示。 Z_0 为单位长度线路阻抗。

$$l_{mf} = \left| \frac{Z_{mn} \Delta \dot{I}_{Re_n}}{Z_0 (\Delta \dot{I}_{Re_m} + \Delta \dot{I}_{Re_n})} \right|, l_{nf} = l_{mn} - l_{mf} \quad (4)$$

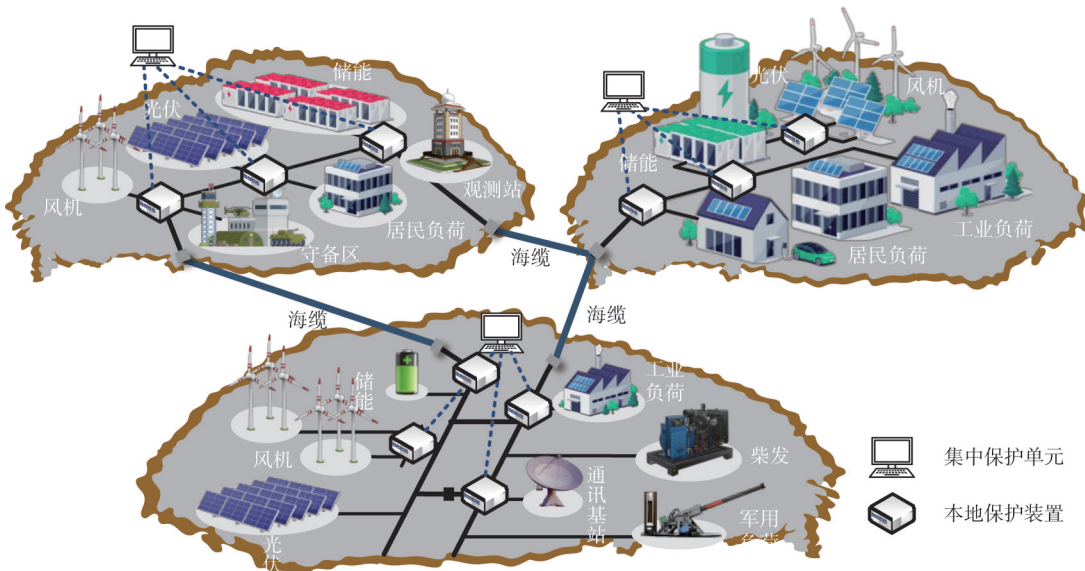


图 1 典型微电网群拓扑结构

Fig. 1 Typical microgrid cluster topology

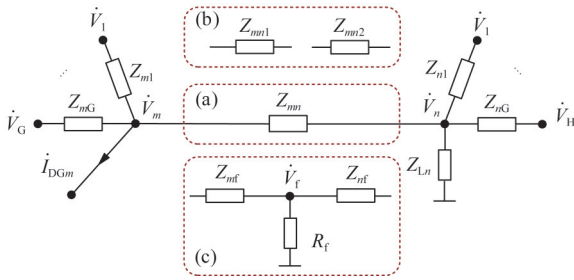


图2 不同工况下主干线路的基频等效电路

Fig. 2 Fundamental equivalent circuit of backbone feeder under different scenarios

对于区外故障,当故障发生在第*i*条与节点*m*相邻的主干线路上时,可得 $\Delta \dot{I}_{\text{Re}_m} = \frac{\dot{V}_m - \dot{V}_i}{Z_{mk}} - \frac{\dot{V}_m - \dot{V}_f}{Z_{mf}}$, $\Delta \dot{I}_{\text{Re}_n} = 0$ 。当故障发生在与节点*n*相邻的负荷分支上时,可得 $\Delta \dot{I}_{\text{Re}_m} = 0$, $\Delta \dot{I}_{\text{Re}_n} = -\frac{\dot{V}_n}{R_f // Z_{Ln}} + \frac{\dot{V}_n}{Z_{Ln}}$ 。

图3为不同工况下微电网间互联线路的基频等效电路。

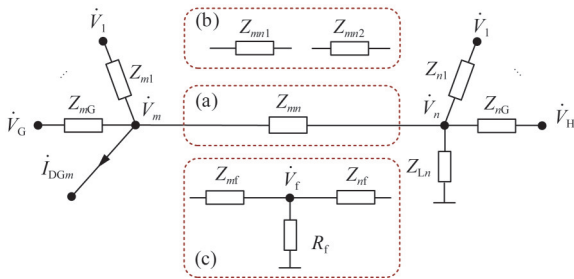


图3 不同工况下微电网间互联线路的基频等效电路

Fig. 3 Fundamental equivalent circuit of Interconnecting feeder under different scenarios

2.2 微电网间互联线路的节点虚拟漏电流特性

不同工况下的基频等效电路如图3所示。 Z_{mn} 和 Y_{mn} 分别为 π 形等效电路的阻抗和导纳,如式(5)所示。 Y_0 为单位长度线路导纳; Z_c 为波阻抗,等于 $\sqrt{Z_0/Y_0}$; γ 为传输系数,等于 $\sqrt{Z_0 Y_0}$; Y_{mf} 和 Y_{nf} 分别为两端节点到故障点的导纳。

$$l_{mf} = \left| \frac{Z_{mn} \Delta \dot{I}_{\text{Re}_n}}{Z_0 (\Delta \dot{I}_{\text{Re}_m} + \Delta \dot{I}_{\text{Re}_n})} \right|, l_{nf} = l_{mn} - l_{mf} \quad (5)$$

如图3(a)所示,正常运行工况下线路两端虚拟漏电流满足 $\Delta \dot{I}_{\text{Re}_m} = 0$, $\Delta \dot{I}_{\text{Re}_n} = 0$, 与主干线路

类似。

如图3(b)所示,正常扰动条件下线路两端虚拟漏电流为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{\text{Re}_m} = (\dot{V}_m - \dot{V}_n)/Z_{mn} + Y_{mn} \dot{V}_m/2 \\ \Delta \dot{I}_{\text{Re}_n} = (\dot{V}_n - \dot{V}_m)/Z_{mn} + Y_{mn} \dot{V}_n/2 \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\Delta \dot{I}_{\text{Re}_m} + \Delta \dot{I}_{\text{Re}_n} = 0.5 Y_{mn} (\dot{V}_m + \dot{V}_n)$ 。由于并联导纳的分流作用, $\Delta \dot{I}_{\text{Re}_m}$ 和 $\Delta \dot{I}_{\text{Re}_n}$ 的和不等于0。

如图3(c)所示,区内故障条件下线路两端虚拟漏电流为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{\text{Re}_m} = \frac{\dot{V}_m - \dot{V}_n}{Z_{mn}} + \frac{Y_{mn} \dot{V}_m}{2} - \frac{\dot{V}_m - \dot{V}_f}{Z_{mf}} - \frac{Y_{mf} \dot{V}_m}{2} \\ \Delta \dot{I}_{\text{Re}_n} = \frac{\dot{V}_n - \dot{V}_m}{Z_{mn}} + \frac{Y_{mn} \dot{V}_n}{2} - \frac{\dot{V}_n - \dot{V}_f}{Z_{nf}} - \frac{Y_{nf} \dot{V}_n}{2} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\Delta \dot{I}_{\text{Re}_m}$ 和 $\Delta \dot{I}_{\text{Re}_n}$ 大于0。随着 Z_{mf} 增大, $\Delta \dot{I}_{\text{Re}_m}$ 减小而 $\Delta \dot{I}_{\text{Re}_n}$ 增加。

特别地,由于微电网间互联电缆长度通常小于20 km, $Z_{mn} \approx Z_0 l_{mn}$ 且 $Y_{mn} \approx Y_0 l_{mn}$ 成立,因此式(7)可以简化为式(8)。然后,通过最小二乘法即可估算得到互联线路两端节点到故障点的距离。

$$\begin{cases} l_{mf} \Delta \dot{I}_{\text{Re}_m} - (l_{mn} - l_{mf}) \Delta \dot{I}_{\text{Re}_n} = 0.5 [l_{mf} (l_{mn} - l_{mf}) Y_0 \dot{V}_m - l_{mf} (l_{mn} - l_{mf}) Y_0 \dot{V}_n] \\ l_{nf} = l_{mn} - l_{mf} \end{cases} \quad (8)$$

当故障发生在与节点*m*相邻的第*i*条主干线路上时,可得 $\Delta \dot{I}_{\text{Re}_m} = \frac{\dot{V}_m - \dot{V}_i}{Z_{mi}} + \frac{Y_{mi} \dot{V}_m}{2} - \frac{\dot{V}_m - \dot{V}_f}{Z_{mf}} - \frac{Y_{mf} \dot{V}_m}{2}$ 和 $\Delta \dot{I}_{\text{Re}_n} = 0$, 其中 Z_{mi} 、 Y_{mi} 分别为与节点*m*相邻的第*i*条主干线路的线路阻抗与导纳,即节点*m*与相邻节点*i*之间的线路阻抗。当故障发生在相邻有源分支或负载分支上时,线路虚拟漏电流与微电网内主干线路类似。

综上,正常扰动、区内及区外故障工况下的线路两端的虚拟漏电流特性可总结为表2所示。

3 所提故障检测与定位方法

3.1 基于节点虚拟漏电流的故障检测与定位判据

1) 故障启动判据。由于故障或非故障扰动均表现为节点的增加、减少或线路阻抗的变化,或扰动时刻临近节点的虚拟漏电流会显著增大,而

表 2 不同工况下线路两端的虚拟漏电流特性

Tab. 2 Both end node virtual residual currents of the backbone feeder under different scenarios

工况	虚拟漏电流特性
正常扰动	$ \Delta \dot{I}_{Re_m} > 0, \Delta \dot{I}_{Re_n} > 0$ 且 $ \Delta \dot{I}_{Re_m} + \Delta \dot{I}_{Re_n} = 0$
区外故障	$ \Delta \dot{I}_{Re_m} = \Delta \dot{I}_{Re_n} = 0$ 或 $ \Delta \dot{I}_{Re_m} > 0, \Delta \dot{I}_{Re_n} = 0$ 或 $ \Delta \dot{I}_{Re_m} = 0, \Delta \dot{I}_{Re_n} > 0$
区内故障	$ \Delta \dot{I}_{Re_m} > 0, \Delta \dot{I}_{Re_n} > 0$ 且 $ \Delta \dot{I}_{Re_m} + \Delta \dot{I}_{Re_n} > 0$

其他节点的虚拟漏电流聚集在零附近, 因此本文采用统计方法进行异常节点虚拟漏电流检测, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} N_{VRC} = \text{count} \{ |\Delta \dot{I}_{Re_ij}| > \Delta I_{Re_th} \} \geq 1 \\ i = 1, 2, \dots, M, j = a, b, c \end{cases} \quad (9)$$

式中: N_{VRC} 为虚拟漏电流大于阈值 ΔI_{Re_th} 的数量; $\Delta I_{Re_th} = 10 \times \text{Median} \{ |\Delta \dot{I}_{Re_ij}| \}$; M 为微电网节点数量。

2) 故障检测判据。根据主干线路的节点虚拟漏电流特性, 构建主干线路故障检测判据, 如式(10)所示。

$$\begin{cases} |\Delta \dot{I}_{Re_mj}| > \Delta I_{th_mj} \\ |\Delta \dot{I}_{Re_nj}| > \Delta I_{th_nj} \\ |\Delta \dot{I}_{Re_mj}| + \Delta \dot{I}_{Re_nj}| > |\Delta \dot{I}_{Re_mj}| - \Delta \dot{I}_{Re_nj}|, j = a, b, c \end{cases} \quad (10)$$

其中, 阈值动态选择为 $\Delta I_{th_mj} = K_{re} |\dot{I}_{nm_calj}|$ 和 $\Delta I_{th_nj} = K_{re} |\dot{I}_{nm_calj}|$, 避免测量误差影响保护性能。

3.2 所提方法的具体流程

图4展示了所提保护方法流程, 配置在每个微电网集中保护单元中。具体步骤如下。

步骤1: 相关电气数据采集。测量微电网内所有节点电压、相邻微电网的互联节点电压、微源输出电流和柔性负荷分支电流。本地保护装置计算测量量的基频幅值和相位, 并传输至集中保护单元。

步骤2: 故障启动判断。根据已知的微电网系统配置和参数, 计算内部节点和互联节点的虚拟漏电流, 统计虚拟漏电流大于阈值 ΔI_{Re_th} 的节点数量 N_{VRC} 。当 $N_{VRC} \geq 1$ 时, 启动故障检测和定位程序。

步骤3: 故障检测和定位。基于故障检测判据, 利用虚拟漏电流识别故障线路和故障相。检测到故

障线路后, 集中保护单元向线路两端保护装置发送跳闸信号, 分相隔离故障区段。同时, 考虑岛内电缆和岛间海缆的差异, 利用虚拟漏电流估算故障距离, 以指导故障排查。

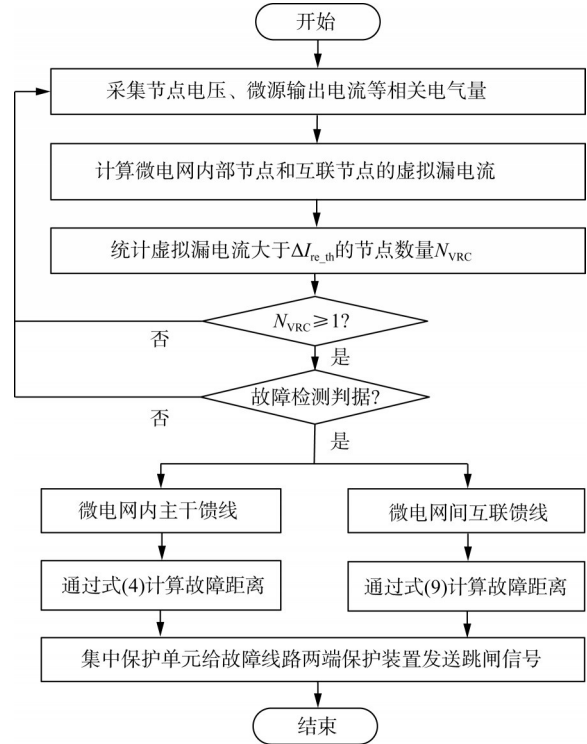


图4 保护流程

Fig. 4 Protection flowchart

4 性能验证

图5展示了包括3个微电网MG-A、MG-B和MG-C的10 kV海岛微电网群模型, 其中, 两个柴发DSG1和DSG2的额定容量均为1 MVA, 5个分布式新能源IBDG1-IBDG5的额定容量均为0.5 MW。负载L1、L2、L4—L8的额定容量均为0.5 MVA, 功率因数为0.95。负载L3的额定容量为1 MVA, 功率因数为0.95。主干电缆长度均为2 km, 单位长度的正序和零序电阻、电感和电容分别为0.193 Ω/km、0.341 mH/km、0.339 μF/km和2.7 Ω/km、1.012 mH/km、0.28 μF/km, 互联海缆长度均为20 km, 单位长度正序和零序电阻、电感和电容分别为0.143 Ω/km、0.453 mH/km、0.128 μF/km和2.13 Ω/km、1.321 mH/km、0.118 μF/km。表3展示了海岛微电网群中岛内主干线路、岛间互联线路上的故障工况设置情况。

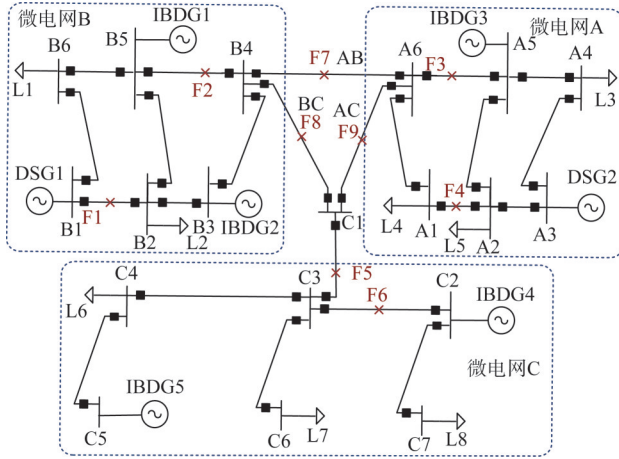


图5 10 kV海岛微电网群的拓扑结构

Fig. 5 Topological structure of a 10 kV island microgrid cluster

表3 微电网群的故障工况设置

Tab. 3 Fault condition setup for microgrid clusters

故障	故障位置	故障电阻/ Ω	故障类型
F1	MG-B, 主线路12	0.1	AB相短路故障
F2	MG-B, 主线路45	1	AB相接地故障
F3	MG-A, 主线路45	100	三相短路故障
F4	MG-A, 主线路16	0.1	BC相短路故障
F5	MG-C, 主线路13	1	BC相接地故障
F6	MG-C, 主线路23	100	三相短路故障
F7	互联线路AB	1	AB相短路故障
F8	互联线路BC	10	AB相接地故障
F9	互联线路AC	100	三相短路故障

4.1 微电网内的主干线路保护结果

图6给出了在不同故障工况下微电网内主干线路保护结果,包括3个微电网所有节点的虚拟漏电流分布、故障微电网中所有线路两端的虚拟漏电流幅值与虚拟漏电流之和幅值以及相应动态整定值。柱状图分别表示 ΔI_{re_ma} 、 ΔI_{re_na} 、 $|\Delta I_{re_ma} + \Delta I_{re_na}|$ 、 ΔI_{re_mb} 、 ΔI_{re_nb} 、 $|\Delta I_{re_mb} + \Delta I_{re_nb}|$ 、 ΔI_{re_mc} 、 ΔI_{re_nc} 、 $|\Delta I_{re_mc} + \Delta I_{re_nc}|$ 。圆圈分别表示对应的 I_{th_ma} 、 I_{th_na} 、 $|\Delta I_{re_ma} - \Delta I_{re_na}|$ 、 I_{th_mb} 、 I_{th_nb} 、 $|\Delta I_{re_mb} - \Delta I_{re_nb}|$ 、 I_{th_mc} 、 I_{th_nc} 、 $|\Delta I_{re_mc} - \Delta I_{re_nc}|$ 。由图6(a)可知,故障工况F1下MG-B中线路12两端的虚拟漏电流大于阈值 ΔI_{re_th} ,可以激活故障保护程序。线路12两端A相和B相虚拟漏电流幅值满足条件故障检测判据1,表明所提保护方法可以准确识别故障线路和故障相。类似地,由图9(b)-(f)可知,故障工况F2至F6下,所有节点的虚拟漏电流分布均满足故障保护启动判据。并且仅故障线路(即

MG-B的线路45、MG-A的线路45、MG-A的线路16、MG-C的线路13、MG-C的线路23)两端节点的故障相虚拟漏电流幅值和虚拟漏电流之和幅值满足故障保护判据#1,表明可以准确检测故障线路和故障相。

此外,在故障工况F1至F6下,故障电阻为1 Ω 、10 Ω 和100 Ω 时,故障定位结果如图7所示。当故障位置、故障电阻和故障类型不同时,微电网内部主干线路的故障距离计算误差均在3%以内。

4.2 微电网间的互联线路保护结果

故障工况F7至F9下3个微电网互连节点的虚拟漏电流分布、互联两端的虚拟漏电流幅值与虚拟漏电流之和幅值以及相应的动态整定值如图8所示。

可以看出,当互联线路AB上发生相间短路故障时,线路AB两端的虚拟漏电流幅值增加,会启动MG-A和MG-B的故障区段识别和定位程序。并且A相和B相的虚拟漏电流幅值以及虚拟漏电流之和的幅值均大于相应的保护整定值。当互联线路BC上发生两相接地故障时,MG-B和MG-C的故障保护程序启动,并且仅互联线路BC两端节点的A相和B相虚拟漏电流幅值以及虚拟漏电流之和的幅值满足故障保护判据1。类似地,当互联线路AC上发生三相短路故障时,节点A-6和C-1的虚拟漏电流增加,可分别启动MG-A和MG-C的故障保护程序。并且互联线路AC两端的三相虚拟漏电流幅值以及虚拟漏电流之和的幅值满足保护标准1。结果表明所提保护方法可准确检测故障线路和故障相。

此外,在故障F7至F9下,故障距离为2 km和10 km,故障阻抗分别为1 Ω 、10 Ω 和100 Ω 时,故障定位结果如图9所示。故障定位、故障电阻和故障类型不同时,互联海缆的故障距离计算误差低于5%。

4.3 低压微电网的线路保护结果

为实现可再生能源有效利用,低压储能微网是一种快速发展的新型电网结构,而对于低压微网系统,线路电流减小,节点电压降落明显,线路保护需求增加。为检测本文所提故障定位方法的有效性,本文验证380 V低压微网下利用虚拟漏电流的故障定位准确性。模拟低压海岛微电网主干线路与

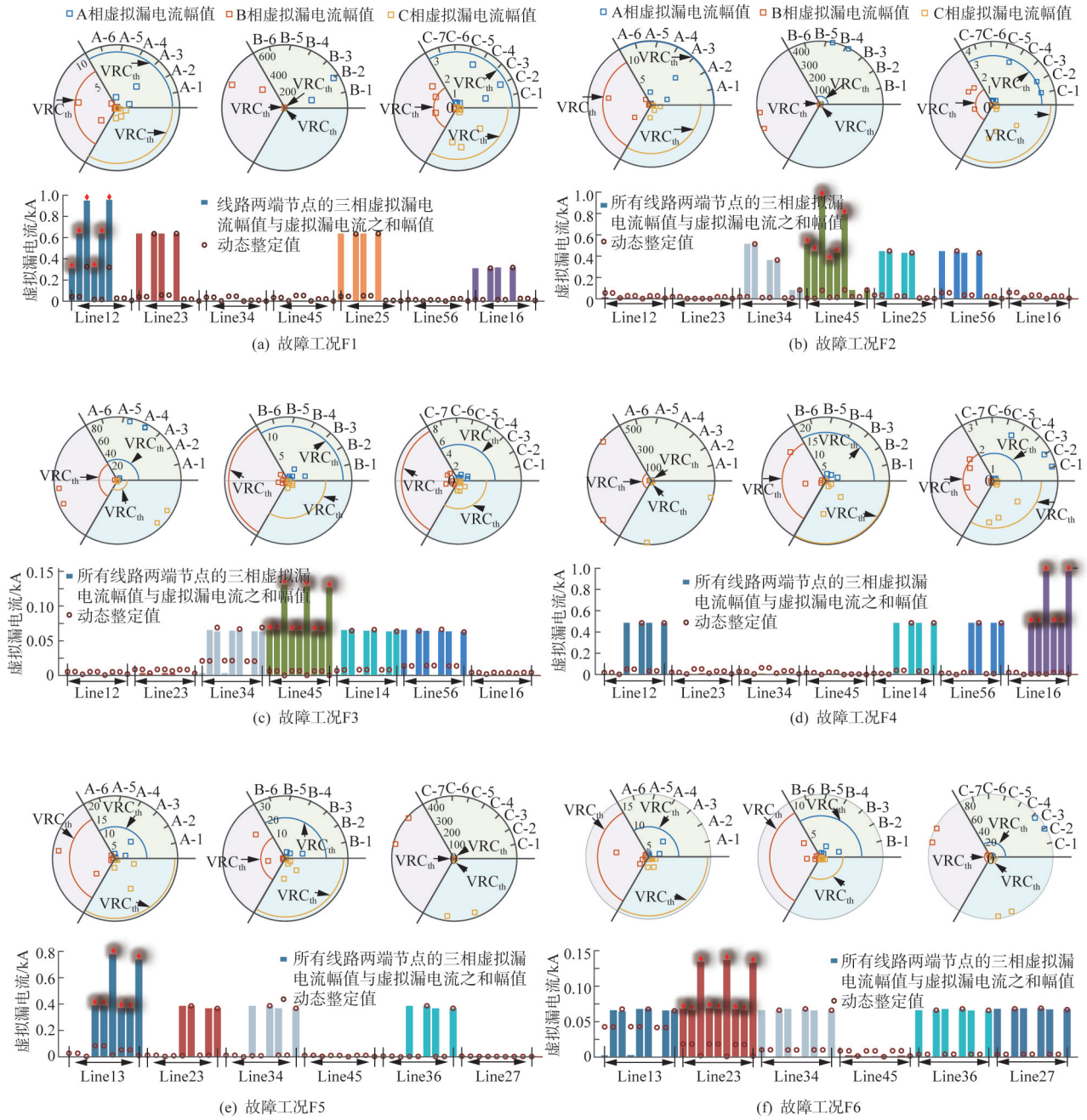


图6 不同故障工况下海岛微电网的主干线路保护结果

Fig. 6 Backbone feeder protection results of islanded networked microgrid under different fault scenarios

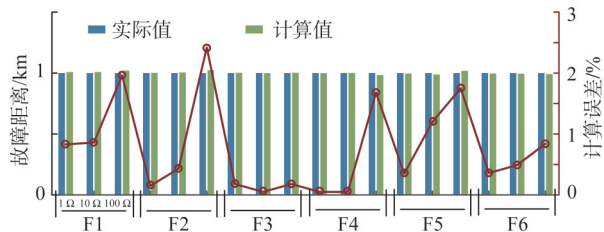


图7 不同故障工况下微电网内主干线路的故障定位精度

Fig. 7 Backbone feeder fault location accuracy under different faults

互联线路故障定位情况, 故障工况 F1、F7 下 3 个微电网各节点的虚拟漏电流分布、互联两端的虚拟漏电流幅值与虚拟漏电流之和幅值以及相应的动态整定值如图 10 所示。

由图 10 可知, 低压微电网群的虚拟漏电流整体水平降低, 但故障处虚拟漏电流特征仍然明显满足故障保护判据#1, 可明确判定出故障发生线路与故障相位。此外, 低压电网整体阻抗降低, 分别分

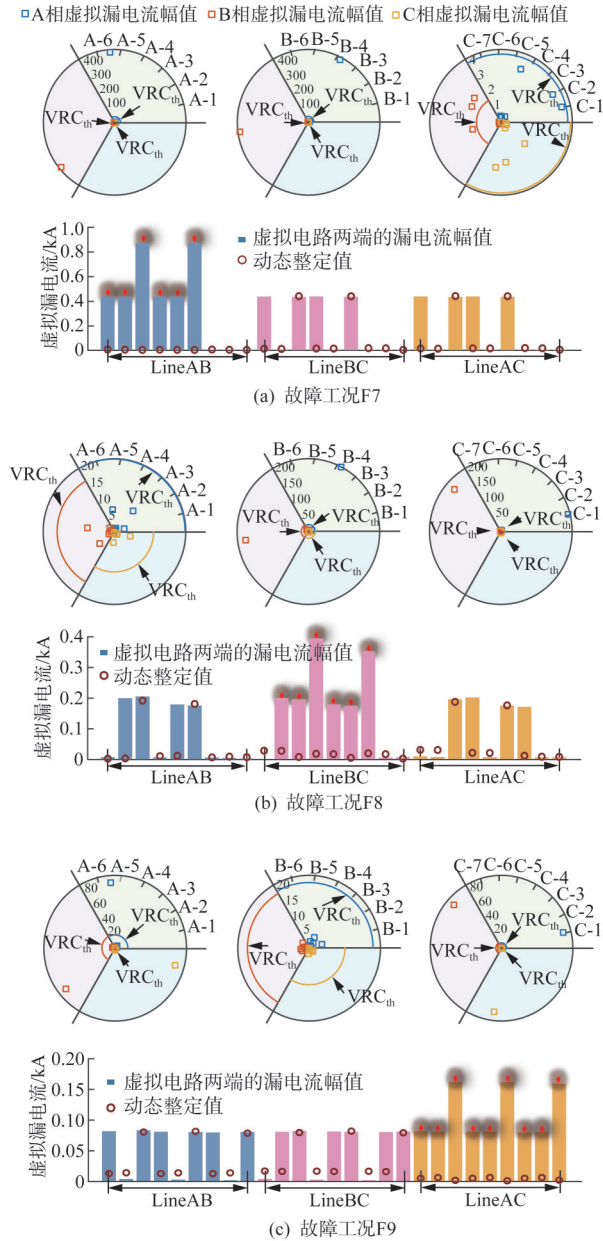


图8 不同故障工况下海岛微电网群的互联线路保护结果

Fig. 8 Protection results of interconnection lines in islanded microgrid clusters under different fault conditions

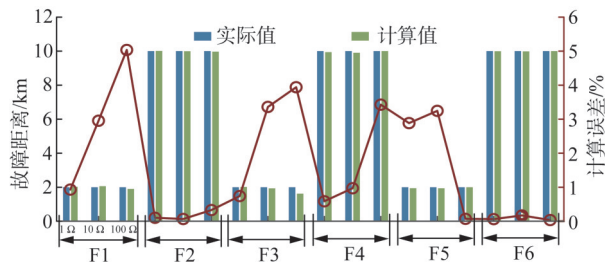


图9 不同故障工况下微电网间互联线路的故障定位精度
Fig. 9 Interconnecting feeder fault location accuracies of microgrid under different faults

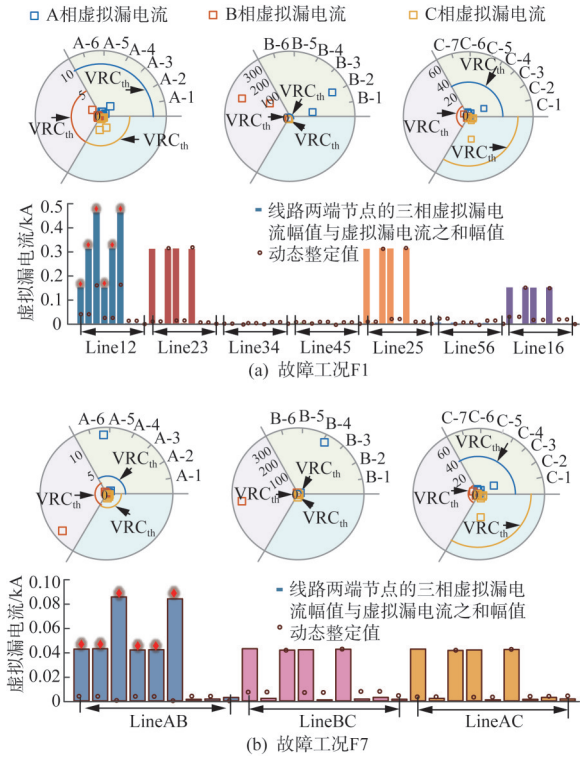


图10 不同故障工况下低压海岛微电网群线路保护结果
Fig. 10 Line protection results of LV island microgrid cluster under different fault conditions

析故障电阻为 $0.1\ \Omega$ 、 $1\ \Omega$ 和 $10\ \Omega$ 时,故障定位结果如图11所示。当故障位置、故障电阻和故障类型不同时,微电网故障距离计算误差均在3%以内。

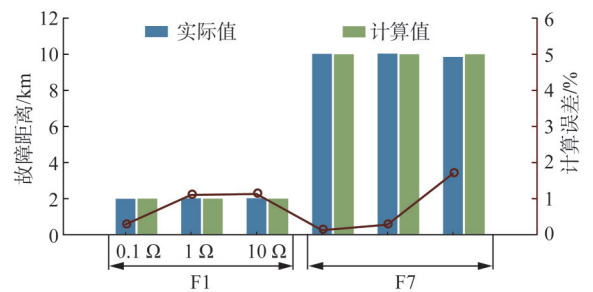


图11 不同故障工况下低压微电网故障定位精度
Fig. 11 Fault location accuracy of LV microgrid under different faults

4.4 不同负荷类型和容量下的线路保护结果

此外,考虑线路非线性特征影响,本文添加不控整流负荷进行验证。将节点B6、A5处负荷设置为不控整流负荷,并改变负荷容量,模拟故障工况F3下微电网故障定位情况,以验证本文所提方法在负荷类型及容量变化情况下的适用性。设置负荷额

定容量分别为 0.5 MVA、1 MVA 下 3 个微电网各节点的虚拟漏电流分布、互联两端的虚拟漏电流幅值与虚拟漏电流之和幅值以及相应的动态整定值如图 12 所示。

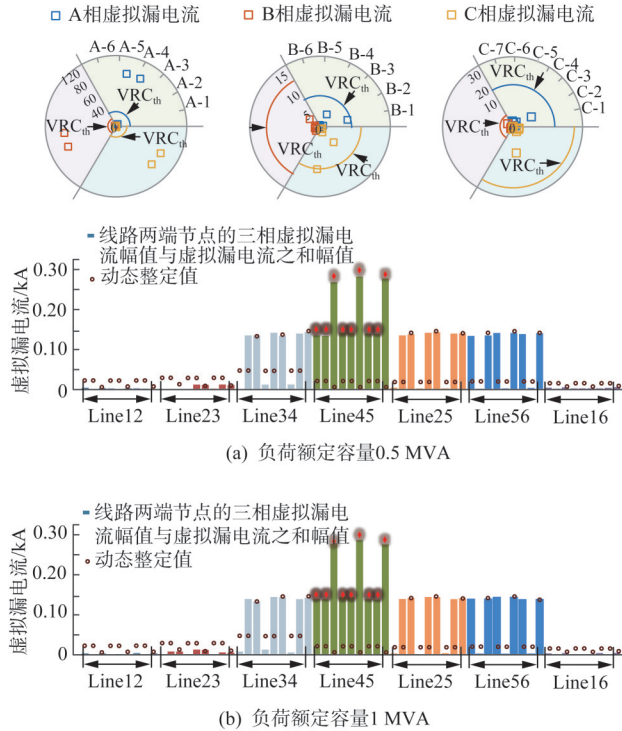


图 12 故障工况 F3 下含非线性负荷海岛微电网群线路保护结果

Fig. 12 Line protection results of the island microgrid cluster containing nonlinear loads under fault condition F3

由图 12 可知, 加入不可控负荷后 ABC 三相虚拟漏电流幅值略微有所差异, 但漏电流特征仍然明显, 与 4.1 节中验证无异。而负荷容量增大时, 三相漏电流不平衡程度与部分节点漏电流略微增大, 但对故障判定并无影响, 可忽略不计。从理论分析而言, 本文所提故障检测方法采用基频信号计算虚拟漏电流幅值, 故在系统稳定情况下, 线路非线性特征并不会造成该方法失效。而负荷增大时线路电流增大, 节点间压降增大以致漏电流增大, 与实验结果相符。故由实验验证可知, 改变负荷类型与容量对本文所提基于虚拟漏电流的微电网群故障定位方法并无影响。

4.5 不同微源类型和容量下的线路保护结果

微源的类型也影响着微网系统的运行状态, 孤岛运行下的微网一般采取主从控制策略, 微源主要有跟网型微源和构网型微源。上文 4.3 节低压微电

网验证中, 为配合电压等级与负荷变化, 将微源 IBDG1-IBDG5 额定容量调节至 0.05 MV。为验证微源类型与容量变化的影响, 在低压微电网的仿真模型基础上将 IBDG5 由 PV 控制转换为下垂控制。仿真故障工况 F4、F9 下, 3 个微电网各节点的虚拟漏电流分布、互联两端的虚拟漏电流幅值与虚拟漏电流之和幅值以及相应的动态整定值如图 13 所示。

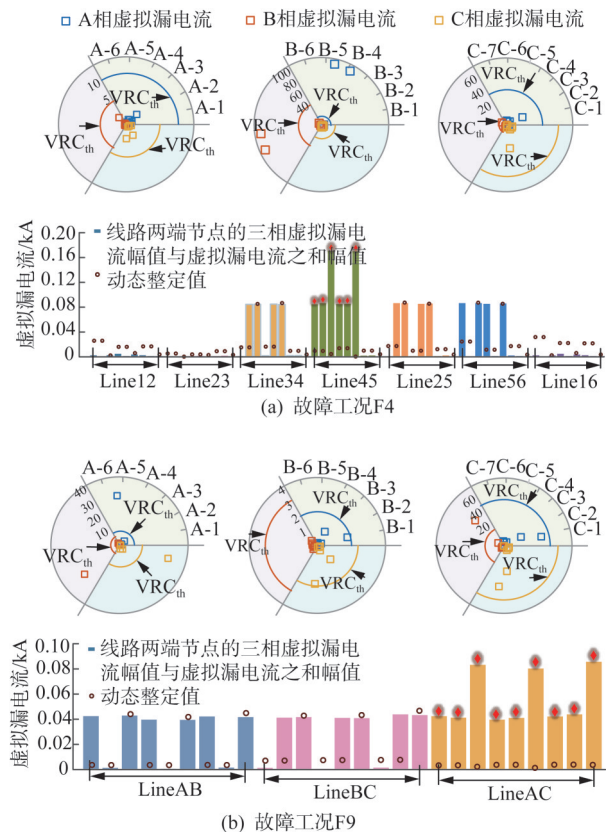


图 13 微源类型和容量变化下海岛微电网群线路保护结果

Fig. 13 Line protection results for the island microgrid cluster under changing micro-source type and capacities

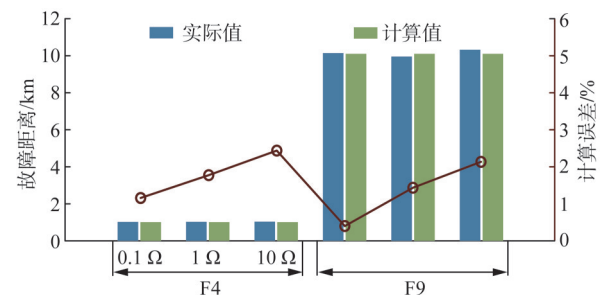


图 14 微源类型与容量变化下微电网故障定位精度

Fig. 14 Microgrid fault location accuracies under micro-source types and capacities variation

由仿真结果可知,微源类型与容量变化下故障定位效果与上文中验证无异,且故障定位距离计算误差在3%以内。故只要配合系统输出,在系统稳定的情况下,改变微网负荷类型与容量并不会影响本文所提基于虚拟漏电流故障定位方法的准确度。

据上述分析,在更复杂的场景切换下,除因海缆距离导致互联线路故障定位误差度略高于3%外,本文所用故障定位方法不同故障工况下的准确度误差均低于3%,验证了本文所提基于虚拟漏电流故障定位方法的可行性与准确性。

5 结语

本文提出适应弱联络场景的海岛微电网群故障检测与定位方法,利用节点电压信息构建了虚拟漏电流信息,故障线路两端虚拟漏电流幅值及虚拟漏电流之和的幅值均大于0,基于此构建的故障线路检测判据可准确区分区内外故障。考虑弱联络场景下线路分布电容的影响,构建主干线路和互联线路的故障距离计算模型,检验低压、负荷变化、微源变化等多种复杂场景下故障识别情况,故障定位精度均大于95%。

参考文献

- [1] 赵波,李得民,吴在军,等.基于100%绿色能源供电目标的海岛微电网容量优化配置[J].中国电机工程学报,2021,41(3):932-946.
ZHAO Bo, LI Demin, WU Zaijun, et al. Capacity optimization of island microgrid group based on 100% green energy power supply[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 932-946.
- [2] 王睿,孙秋野,张化光,等.基于信-能复合调制的多母线直流微电网电流边缘控制策略[J].控制与决策,2023,38(10):2783-2794.
WANG Rui, SUN Qiuye, ZHANG Huagang, et al. Current edge control strategy for multi-bus DC microgrid based on signal-energy composite modulation[J]. Control and Decision, 2023, 38(10): 2783-2794.
- [3] 周龙,齐智平.微电网保护研究综述[J].电力系统保护与控制,2015,43(13):147-154.
ZHOU Long, QI Zhiping. A review of the research on microgrid protection development[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [4] 范文超.微电网保护策略研究[D].南京:东南大学,2019.
- [5] 何梨梨.计及微源特性与多母线结构影响的孤岛微电网保护关键技术研究[D].长沙:湖南大学,2022.
- [6] 李彦宾,贾科,毕天姝,等.逆变型电源对故障分量方向元件的影响机理研究[J].电网技术,2017,41(10):3230-3236.
LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Influence mechanism of inverter-interfaced renewable energy generators on fault component based directional relay[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3230-3236.
- [7] 戴明,贾科,方煜,等.独立运行微电网的故障特性分析及其线路保护研究[J].电力自动化设备,2019,39(4):133-140.
DAI Ming, JIA Ke, FANG Yu, et al. Fault characteristic analysis and line protection research of independent microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 133-140.
- [8] 周涵,牟龙华,郭文明.基于故障分量的孤岛微电网保护[J].电工技术学报,2017,32(17):11-20.
ZHOU Han, MOU Longhua, GUO Wenming. Islanded microgrid protection based on fault components[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 11-20.
- [9] HE L, SHUAI Z, CHU X, et al. Waveform difference feature-based protection scheme for islanded microgrids[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2021, 12(3): 1939-1952.
- [10] 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. Microgrid protection scheme based on improved current phase difference protection[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2023, 60(9): 132-137.
- [11] 朱苑祺,杨明玉,郑灿,等.基于低电压的反时限微网保护方案[J].电测与仪表,2017,54(18):8-14.
ZHU Yuanqi, YANG Mingyu, ZHENG Can, et al. Inverse-time protection scheme for micro-grids based on low-voltage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(18): 8-14.
- [12] 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-level collaborative inverse time protection scheme for microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 623-633.
- [13] 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.
- [14] SALEH K A, MEHRIZI-SANI A. Harmonic directional overcurrent relay for islanded microgrids with inverter-based DGs[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(2): 2720-2731.
- [15] 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 of micro-grid based on harmonic current injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 172-179.
- [16] 方重凯,牟龙华,欧锐,等.基于控保协同的微电网注入式保护方法研究[J].中国电机工程学报,2023,43(9):3389-3402.
FANG Zhongkai, MOU Longhua, OU Ruiet al. Research on injection protection method of microgrid based on control and protection coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3389-3402.
- [17] 赵怀健,牟龙华,方重凯.零序非工频分量注入式微电网接地故障保护方案[J].电力自动化设备,2022,42(11):25-31.

- ZHAO Huaijian, MOU Longhua, FANG Zhongkai. Zero sequence non-power frequency component injection microgrid grounding fault protection Scheme[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11): 25 – 31.
- [18] 吴翔宇, 张晓红, 许寅, 等. 微电网(群)宽频振荡分析和抑制研究进展与展望[J]. 电网技术, 2023, 49(9): 3727 – 3745.
- WU Xiangyu, ZHANG Xiaohong, XU Yin, et al. Research progress and prospect of wide-band oscillations analysis and suppression for microgrid (clusters) [J]. Power System Technology, 2023, 49(9): 3727 – 3745.
- [19] 马立红, 梁亚峰, 邱剑洪, 等. 锁相锁幅控制技术及其在孤立海岛微电网的应用[J]. 南方电网技术, 2024, 18(9): 97 – 105.
- MA Lihong, LIANG Yafeng, QIU Jianhong, et al. Amplitude-phase-locked-loop control technology and its application in the isolated island micro grid[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(9): 97 – 105.
- [20] 李昊, 赵成勇, 熊小玲. 大规模风电接入的特高压混合级联直流系统送端频率控制策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(11): 10 – 21.
- LI Hao, ZHAO Chengyong, XIONG Xiaoling. Frequency control strategy for sending-end of hybrid cascaded UHVDC system interconncted with large-scale wind power [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(11): 10 – 21.
- [21] 李军, 包那琴, 陈建华, 等. 孤岛混合微电网电源故障后电压/频率无差控制[J]. 南方电网技术, 2025, 19(1): 150 – 159.
- LI Jun, BAO Naqin, CHEN Jianhua, et al. Error-free Control of voltage/frequency after power source failure in isolated hybrid microgrids [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(1): 150 – 159.
- [22] 李占凯, 祁绍洋, 张福民, 等. 基于集成三端口的混合微网场景自适应功率协同控制策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(11): 41 – 50.
- LI Zhankai, BING Shaoyang, ZHANG Fumin, et al. Adaptive power cooperative control strategy of hybrid microgrid scenarios based on integrated three-port [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(11): 41 – 50.

收稿日期: 2024-04-17; 网络首发日期: 2025-05-17

作者简介:

向真(1975), 女, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电网规划与建设;

谈赢杰(1989), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为微电网, tanyjl@csg.cn;

舒放(1987), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力通信技术。

广 告

电网仿真重点实验室……………封二
南方电网科技创新中心……………A2

南网知识星球……………封三