

四维坐标系下并网型光伏微电网故障区域判定技术

李洪涛¹, 马永亮²

(1. 国网河北省电力有限公司正定县供电分公司, 河北 石家庄 050800;

2. 天津天大求实电力新技术股份有限公司, 天津 300380)

摘要: 为了合理划分微电网拓扑结构, 精准判定各种微电网故障情况下的故障区域, 提出一种四维坐标系下并网型光伏微电网故障区域判定技术。令微电网拓扑结构为坐标图, 设备节点为坐标点, 以坐标点间最小欧式距离最大化, 平均最近邻坐标点数量最小化为划分依据, 通过球填充四维坐标点集的集合划分方法, 划分微电网拓扑结构, 获取微电网划分区域; 以各划分区域为节点, 断路器为边, 通过图论算法构建微电网故障数学模型, 依据故障前后功率变化量和区域故障电流方向, 建立故障区域判定矩阵, 实现故障区域判定。试验证明: 该技术可有效划分微电网拓扑结构, 划分后可有效提升微电网信号传输效果; 在出现多重故障、两相故障与系统侧故障情况下, 该技术均可精准判定故障区域。

关键词: 四维坐标系; 并网型; 光伏微电网; 故障区域判定; 球填充

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)01-0083-07

doi: 10.12177/emca.2022.148

Fault Area Determination Technology of Grid-Connected Photovoltaic Microgrid in 4D Coordinate System

LI Hongtao¹, MA Yongliang²

(1. Zhengding County Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd.,

Shijiazhuang 050800, China;

2. Tianjin Tianda Qiushi Electric Power High Technology Co., Ltd., Tianjin 300380, China)

Abstract: In order to reasonably divide the microgrid topology and accurately determine the fault area under various microgrid faults, a fault area determination technology of grid connected photovoltaic microgrid in 4D coordinate system is proposed. The microgrid topology is taken as a constellation diagram and the equipment nodes are selected as constellation points. On the basis of maximizing the minimum Euclidean distance between constellation points and minimizing the number of average nearest neighbor constellation points, using the set division method of ball filling 4D constellation point set to divide the microgrid topology and obtain the microgrid division area. Taking each divided area as the node and the circuit breaker as the edge, the microgrid fault mathematical model is constructed by graph theory algorithm. According to the power change before and after the fault and the direction of regional fault current, the fault area judgment matrix is established to realize the fault area judgment. The experiments show that this technology can effectively divide the microgrid topology and improve the signal transmission effect of microgrid. In case of multiple faults, two-phase faults and system side faults, the technology can accurately determine the fault area.

Key words: four-dimensional coordinate system; grid-connected type; photovoltaic microgrid; fault area determination; ball filling

收稿日期: 2022-06-02; 收到修改稿日期: 2022-10-28

作者简介: 李洪涛(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化。

马永亮(1987—), 男, 本科, 初级工程师, 研究方向为机械制造及其自动化。

0 引言

并网型光伏微电网中,接入较多的光伏电源,令微电网由辐射型单端送电拓扑结构,转换成多端送电拓扑结构,导致微电网内潮流方向不一致^[1],微电网容易出现故障。在微电网出现故障的情况下,电流波动的幅度较大,增加电流保护整定难度,不能判定故障区域^[2-4]。为解决光伏电源接入后引起的问题,需优化一次能源结构,其中,解决这些问题的关键是故障区域判定。朱愉田等^[5]利用约束条件提取微电网故障特征,输入深度强化学习网络,完成微电网故障信息跟踪,采用三端行波测距法,判定故障区域。孟子超等^[6]通过迁移学习改进卷积神经网络(CNN),构建基于迁移学习的CNN,在该网络内输入微电网故障信息,输出故障区域判定结果。但这两种技术只是从功率变化或者故障电流方向判断故障区域,判断单一故障时无法相互验证,划分精度较差。由于上述方法均未考虑微电网并网后同时接入新能源和传统能源,必然会出现多重故障情况,在微电网中出现多重故障时,无法精准判定故障区域,不能实现故障隔离。

四维坐标系下微电网信号传输过程中,可在四个维度中同时改善节点间的最小欧式距离^[7],在不损失谱效率的同时,加快信号渐进功率效率,提升信号传输效果,利于后续微电网多重故障区域判定。为此,研究四维坐标系下并网型光伏微电网故障区域判定技术,精准判定各种故障时的微电网故障区域。利用球填充四维坐标点集的集合划分方法,有效划分微电网拓扑结构,提升信号传输效果;通过图论算法构建微电网故障数学模型,依据故障前后功率变化量、区域故障电流方向以及划分区域和边界的关联,互相验证下建立故障区域综合判定矩阵,实现多重故障区域判定。

1 并网型光伏微电网故障区域判定技术

1.1 四维坐标系下并网型光伏微电网区域划分

利用球填充四维坐标点集的集合划分方法,划分并网型光伏微电网区域,将并网型光伏微电网拓扑结构看成一个四维坐标图,微电网内各设

备节点看成坐标点。四维坐标点集集合划分即并网型光伏微电网区域划分依据共包含两个方面,分别是坐标点间的最小欧式距离与坐标点集的平均最近邻坐标点数量。

在加性高斯白噪声并网型光伏微电网通信内,四维坐标系下微电网接收信号是环绕发送信号服从每向同性分布的^[8],即在不同方向中,接收信号偏离发送信号的概率为一致的。在最大似然接收信号情况下,通过接收信号和参考坐标点之间的欧氏距离判断符号正负。

预测误符号率 S 上限的表达式如下:

$$S \leq \alpha \frac{\sum_{k=1}^X \sum_{l=1, l \neq k}^X \operatorname{erfc}\left(\frac{d_{kl}}{2\sqrt{N_0}}\right)}{2X} \quad (1)$$

式中: α 为并网型光伏微电网的相位常数; N_0 为微电网的空间维度; X 为微电网内坐标点数量; d_{kl} 为欧式距离。

在微电网发送信号为 c_k 的情况下,微电网接收端出现误判概率上限为 N_0 误判成全部 $c_l (l \neq k)$ 的概率总和是 $\sum_{l=1, l \neq k}^X \operatorname{erfc}\left(\frac{d_{kl}}{2\sqrt{N_0}}\right)$ 。如果 N_0 和 c_l 间的 d_{kl} 较小,那么 N_0 误判成 c_l 的概率便较大^[9]。如果存在过渡电阻时,使距离保护的测量阻抗发生变化,产生误动作,针对此类问题,需要严格遵循误符号率较低这一前提,而微电网中四维调制符号的误判基本出现在发送信号为最小欧式距离 $d_{\min}$ 的坐标点中。

高信噪比情况下,可将 S 近似成:

$$S \approx \alpha \gamma \frac{X_{\min} \operatorname{erfc}\left(\frac{E_b}{N_0}\right)}{X} \quad (2)$$

式中: $X_{\min}$ 为微电网内距离 $d_{\min}$ 的坐标点个数; γ 为微电网的渐进功率效率和传输距离间的关系; E_b 为微电网的平均比特能量。

通过式(2)可知,微电网内坐标点间的 $d_{\min}$ 会影响 S , $d_{\min}$ 的坐标点数量 $X_{\min}$ 也会影响 S 。

在坐标点集即并网型光伏微电网拓扑结构中,与坐标点 a 距离是 $d_{\min}$ 的坐标点叫作 a 的最近邻点,令 a 的最近邻点数量为 $X_{d_{\min a}}$ 。通过定义坐标点集即并网型光伏微电网拓扑结构中的平均最近邻点数量为 $\bar{X}_{d_{\min}}$,分析坐标点集的性能。

$\bar{X}_{d_{\min}}$ 表达式如下:

$$\bar{X}_{d_{\min}} = \gamma \frac{\sum_{j=1}^X X_{d_{\min j}}}{X} \quad (3)$$

通过式(2)与式(3)可知, $\bar{X}_{d_{\min}}$ 对 S 的影响。

通过上述分析可知,在坐标点集即并网型光伏微电网拓扑结构中,影响接收端判决的因素是 $d_{\min}$ 与 $\bar{X}_{d_{\min}}$,因此,划分微电网拓扑结构过程中,需尽量令划分后的区域内坐标点间 $d_{\min}$ 最大、 $\bar{X}_{d_{\min}}$ 最小,即将 $d_{\min}$ 最大、 $\bar{X}_{d_{\min}}$ 最小作为划分并网型光伏微电网拓扑结构的原则;在划分坐标点集过程中,需令每个划分区域内坐标点分布情况相同^[3],即每个划分的微电网区域内节点分布情况相同。采用球填充四维坐标点集的集合划分方法,将四维坐标系下并网型光伏微电网划分成八个区域,按照集合划分的依据,将微电网划分成八个区域的具体步骤如下:

步骤 1,排序不同坐标表达式 $\zeta(\pm a, \pm b, \pm c, \pm d)$ 的坐标点集,即并网型光伏微电网节点,排序方式为依据与原点的 d 从小至大分层排序,如果 d 一致,那么将这些坐标点集放在邻近层^[10-12],意味着每层中仅存储一个 ζ 的坐标点集,同时令接近原点的层次为低层。

步骤 2,划分首层坐标点集,获取 d 空间分布相同的 8 个区域,先将原点对称的坐标点对 (a, b, c, d) 与 $(-a, -b, -c, -d)$ 划分至同一区域内。

步骤 3,求解全部划分区域内的 $d_{\min}$ 与 $\bar{X}_{d_{\min}}$,选择 $d_{\min}$ 最大,同时 $\bar{X}_{d_{\min}}$ 最小的划分结果,完成首层坐标点集的划分,即首层并网型光伏微电网拓扑结构划分。

步骤 4,依据由低至高的顺序,依次划分其余层次的坐标点集,划分方式同首层,划分完成后和低层完成划分的八个区域依据步骤 1 进行排序组合,再依据步骤 3 在全部区域组合内选择最佳的划分结果。

步骤 5,反复操作步骤 4,以全部层次划分结束为终止条件,获取最佳并网型光伏微电网拓扑结构划分结果,得到八个划分区域。

并网型光伏微电网拓扑结构经过划分后,可扩大坐标点间的最小欧式距离,减少平均最近邻

坐标点数量,降低微电网信号传输的误符号率^[13],提升信号传输效果,为后续微电网故障区域判定提供帮助。

1.2 并网型光伏微电网故障区域判定的实现

1.2.1 构建并网型光伏微电网故障数学模型

利用图论算法构建并网型光伏微电网故障数学模型,将第 1.1 小节划分出的区域 $O = \{O_1, O_2, O_3, O_4, O_5, O_6, O_7, O_8\}$ 当成有向图的节点,断路器 $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7\}$ 当作有向图的边,并网型光伏微电网拓扑结构当作有向图 $D = \langle V, U \rangle$ 。将 D 内边方向当成流过断路器电流即故障电流的参考方向^[14]。

令 D 的增广关联矩阵是 $G(D) = (g_{ij})_{n \times (n-1)}$,节点编号是 n ,边即故障支路是 $n-1$, g_{ij} 的表达式如下:

$$g_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{同向关联,边方向即故障电流方向离开节点 } O_i \\ -1, & \text{反向关联,边方向即故障电流方向指向节点 } O_i \\ 0, & \text{无关联} \end{cases} \quad (4)$$

按照基尔霍夫电流定律可知,每个节点中的 n 阶综合相电流是 $I_{\Sigma} = (GI_u)_n$, $I_u = [i_1 \ i_2 \ \cdots \ i_g \ \cdots \ i_{n-1}]^T$,边 u_g 的相电流是 i_g 。

每个节点位置的综合相功率是 $P = (VI_{\Sigma})_n$,令并网型光伏微电网中每个节点的电压 V 一致,则 P 与 I_{Σ} 具有正相关关系。

并网型光伏微电网中 $G(D)$ 无法描绘断路器的状态,邻断路器对角矩阵是 $B(D) = (b_{ij})_{n-1}$,将其当成边状态即故障电流状态的描述模型, $B(D)$ 内的对角线元素如下:

$$b_{ii} = \begin{cases} 1, & \text{边闭合即该支路存在故障电流} \\ 0, & \text{边断开即该支路不存在故障电流} \end{cases} \quad (5)$$

利用检测并网型光伏微电网故障前后功率变化量 ΔP ,边方向即故障电流方向是否同向,以及划分区域 O 和边的关联,判断该区域内是否存在故障,将树的基本划分区域矩阵 O_{ij} 当成并网型光伏微电网故障信息模型,该矩阵属于 $n-1$ 阶故障划分区域信息矩阵 $O(D) = (O_{ij})$, O_i 的方向是故障电流方向,表达式如下:

$$O_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{边 } u_j \text{ 在 } O_i \text{ 内,同时 } \Delta P \text{ 和 } O_i \text{ 方向同向} \\ -1, & \text{边 } u_j \text{ 在 } O_i \text{ 内,同时 } \Delta P \text{ 和 } O_i \text{ 方向相反} \\ 0, & \text{边 } u_j \text{ 不在 } O_i \text{ 内,则无故障电流} \end{cases} \quad (6)$$

式中: O_i 为故障电流方向; u_j 为故障支路。

如果某划分区域 O_i 内包含故障电流, 同时 ΔP 和 O_i 方向同向, 那么保护从机向保护主机发送信号 1, 如果 ΔP 和 O_i 方向相反, 那么发送信号 -1; 如果未检测到该划分区域内存在故障电流, 那么发送信号 0。

引入邻接矩阵乘法, 将增广关联矩阵 $G(D)$ 、邻断路器对角矩阵 $B(D)$ 与 $n-1$ 阶故障划分区域信息矩阵 $O(D)$ 相乘, 不断匹配根据故障过流及方向信息, 获取并网型光伏微电网故障区域判定矩阵 $H(D) = O(D) \cdot G(D) \cdot B(D)$, 整个过程是有向的。

1.2.2 并网型光伏微电网故障区域判定准则

获取并网型光伏微电网故障区域判定矩阵后, 按照以下判定准则, 完成故障区域判定, 判定准则如下:

(1) 在 $H_{ii}(D) = 1$ 情况下, 对于全部的 $H_{ji}(D) = 1$ 的 $j(j \neq i)$ 均存在 $H_{ji}(D) = 0$ 或 $H_{ji}(D) = -1$, 那么判定故障区域为 i 与 j 之间, 说明 i 点对应的 ΔP 和 V_i 方向同向, 存在正向故障电流, j 点在 i 点正方向上, 同时 j 与 i 直接连接, j 不存在故障电流, 代表 i 与 j 区域存在故障。

(2) 在 $H_{ii}(D) = -1$ 情况下, 对于全部的 $H_{ji}(D) = 1$ 的 $j(j \neq i)$ 均存在 $H_{ji}(D) = 0$, 那么判定故障区域为 i 与 j 之间, 说明 i 点对应的 ΔP 和 O_i 方向相反, 存在反向故障电流, i 点连接在 j 点正方向下的下方, 同时 j 点未出现故障电流, 代表 i 与 j 区域存在故障, 同时电源处于 i 点下游。

(3) 在 $H_{ii}(D) = 1$ 情况下, 如果全部的 $H_{ji}(D) = 0 (i \neq j)$, 那么判定 i 是末端节点, 同时末端区域存在故障, 说明 i 点对应的 ΔP 和 O_i 方向同向, 存在正向故障电流, 并网型光伏微电网正方向下不存在与 i 直接连接的节点, 代表 i 是末端节点, 同时末端区域存在故障。

通过上述判定准则完成并网型光伏微电网故障区域判定。

2 试验分析

通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件建立并网型光伏微电网模型, 该并网型光伏微电网系统的电压等级是 380 V, 以 T-N 接线方式进行微电网各设备间的连接, 该微电网内共包含 3 条线路, 长度

一致, 均是 170 m, 线路阻抗是 $0.524 \Omega/\text{km}$, 线路 1 中连接重要负荷, 其中分布式光伏电源为一个, 线路 2、3 中连接可中断负荷, 其中分布式光伏电源均为 2 个, 每条线路首端与末端均各设置一个保护装置, 记作保护 1、保护 2, 且各分布式光伏电源出线位置均设有保护装置。并网型光伏微电网具体拓扑结构示意图如图 1 所示。

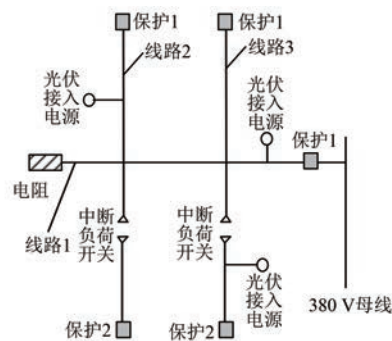


图 1 并网型光伏微电网拓扑结构示意图

试验中为三条线路各设置一种故障, 分别是闭环运行过程中出现多重故障、微电网内部出现两相故障、微电网系统侧发生故障。

利用本文技术划分该并网型光伏微电网的每条线路的拓扑结构, 各获取 8 个区域, 将三条线路微电网拓扑结构当成一个四维坐标图, 四维坐标图的区域划分结果如表 1 所示。

表 1 划分结果

划分区域	坐标点即设备节点坐标		
	线路 1	线路 2	线路 3
O_1	(0, 0, -1, 0)	(0, -1, 0, -1)	(0, 0, 1, 0)
	(0, 1, 0, 1)	(0, -1, 1, 0,)	(-1, -1, 0, 0)
O_2	(0, 1, 0, 0)	(-1, 0, -1, 0)	(0, 0, 0, -1)
	(1, 0, 1, 0)	(0, -1, -1, 0)	(1, 0, 0, 1)
O_3	(0, 0, 1, 0)	(-1, 1, 0, 0)	(1, 0, 0, 0)
	(1, -1, 0, 0)	(0, 1, -1, 0)	(-1, 0, 0, 1)
O_4	(0, -1, 0, 0)	(0, 0, 1, -1)	(1, 0, 0, 0)
	(1, 0, -1, 0)	(0, 1, 1, 0)	(0, -1, -1, 0)
O_5	(0, 0, 0, 1)	(-1, -1, 0, 0)	(-1, 0, 0, 0)
	(1, 1, 0, 0)	(1, 0, 0, -1)	(0, 1, 1, 0)
O_6	(-1, 0, 0, 0)	(0, 0, -1, -1)	(0, 1, 0, 0)
	(0, 0, 1, 1)	(1, 0, 0, 1)	(0, -1, 1, 0)
O_7	(1, 0, 0, 0)	(0, -1, 0, 1)	(0, -1, 0, 0)
	(0, 0, 1, 0)	(-1, 0, 0, -1)	(0, 1, -1, 0)
O_8	(0, 0, 0, -1)	(0, 0, 0, 1)	(0, 0, -1, -1)
	(-1, 0, 1, 0)	(0, 0, 0, -1)	(0, 0, -1, 0)

本文四维坐标系下区域划分的依据是最小欧式距离,与平均最近邻坐标点数量,且坐标点间最小欧式距离越大、平均最近邻坐标点数量越少,微电网内信号传输的误符号率越小,即信号传输效果越好。三条线路划分前后坐标点间的最小欧式距离与平均最近邻坐标点数量的改善情况如图2所示。

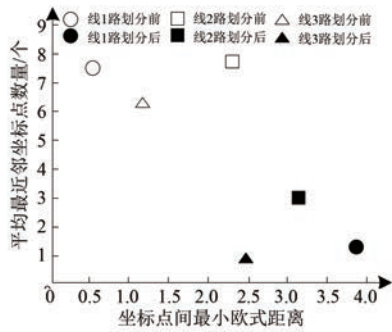


图2 三条线路划分前后的改善情况

综合分析表1与图2可知,本文所提判定技术可有效划分四维坐标系下,并网型光伏微电网三条线路的拓扑结构,每条线路均会划分成八个区域,同时三条线路划分后的坐标点间最小欧式距离均明显大于划分前,平均最近邻坐标点数量均明显低于划分前,说明本文技术划分三条线路后,最小欧式距离与平均最近邻坐标点数量均有所改善,有效降低微电网内信号传输的误符号率,提升信号传输效果。试验证明,所提判定技术可有效划分四维坐标系下,并网型光伏微电网各条线路的拓扑结构,划分后微电网内最小欧式距离与平均最近邻坐标点数量均有所改善,有效提升了微电网信号传输效果。

2.1 线路1闭环运行过程中出现多重故障

将划分后的八个区域当成八个节点,当并网型光伏微电网线路1处于闭环运行状态,同时出现多重故障情况下,线路1中各节点的三相电流变化情况如图3所示。

利用本文所提判定技术构建线路1的故障区域判定矩阵 H_{l1} ,具体如下:

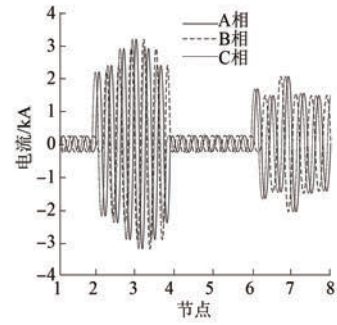


图3 多重故障的三相电流变化情况

$$H_{l1} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据式(7)可知, $H_{22} = 1, H_{23} = 1, H_{24} = 1, H_{33} = -1, H_{44} = -1$,说明节点2~4之间存在故障,且 $H_{66} = 1, H_{67} = 1, H_{68} = 1, H_{77} = -1, H_{88} = -1$,说明节点6~8之间存在故障,图2中节点2~4之间、节点6~8之间的电流波动异常,说明这两个区域确实存在故障,与本文技术判定的故障区域一致。试验证明:在并网型光伏微电网闭环运行过程中出现多重故障时,本文所提判定技术可精准判定故障区域。

2.2 线路2内部出现两相故障

线路2内部出现两相故障的三相电流变化情况如图4所示。

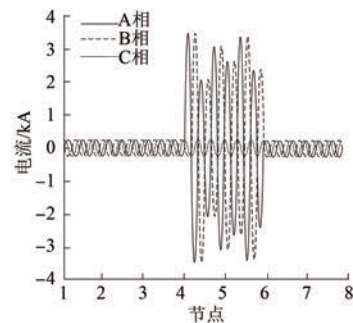


图4 两相故障的三相电流变化情况

利用本文技术构建线路 2 的故障区域判定矩阵 H_{l2} , 具体如下:

$$H_{l2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据式 (8) 可知, $H_{44} = 1, H_{45} = 1, H_{46} = 1, H_{55} = -1, H_{66} = -1$, 说明节点 4~6 之间存在故障, 图 3 中节点 4~6 之间电流波动异常, 说明该区域存在故障, 与本文所提判定技术判定的故障区域一致。试验证明: 在并网型光伏微电网出现两相故障时, 本文所提判定技术也可以精准判定故障区域。

2.3 线路 3 的系统侧发生故障

线路 3 系统侧发生故障时的三相电流变化情况如图 5 所示。

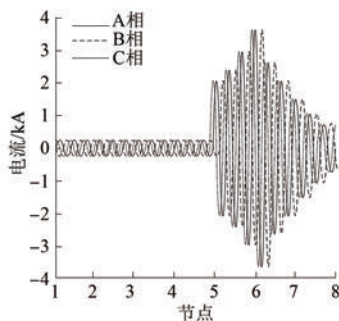


图 5 系统侧发生故障时的三相电流变化情况

利用本文所提判定技术构建线路 3 的故障区域判定矩阵 H_{l3} , 具体如下:

$$H_{l3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据式 (9) 可知, $H_{55} = 1, H_{56} = 1, H_{57} = 1, H_{58} = 1, H_{66} = -1, H_{77} = -1, H_{88} = -1$, 说明节点 5~8 之间存在故障, 图 4 中节点 5~8 之间电流波动异常, 说明该区域存在故障, 与本文所提判定技术判定的故障区域一致。试验证明: 在并网型光伏微电网系统侧出现故障时, 本文所提判定技术依旧可精准判定故障区域。

3 结 语

为提升微电网运行稳定性, 需精准判定故障区域, 及时进行维修工作, 尽快解决故障问题, 为此研究四维坐标系下并网型光伏微电网故障区域判定技术。利用球填充四维坐标点集的集合划分方法, 划分微电网区域; 通过图论算法构建微电网故障数学模型, 依据故障前后功率变化量和区域故障电流方向, 实现故障区域判定。试验结果证明该技术可有效划分微电网拓扑结构, 在出现多重故障、两相故障与系统侧故障情况下, 均可精准判定微电网的故障区域。

【参考文献】

- [1] 李浩茹, 丁保迪, 季宇, 等. 考虑光伏出力间歇性的微电网故障辨识方法[J]. 电力建设, 2020, 41(9): 76.
- [2] 康晴, 罗奕, 卢新佳, 等. 基于变流器控制策略的微电网故障特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 147.
- [3] 刘建峰, 张科翌, 高亮, 等. 基于继电保护信息与改进谱聚类分析的电网故障区域识别算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 37.
- [4] 刘群杰, 樊艳芳, 李峰, 等. 基于多区域相位突变量信息的主动配电网故障定位方案研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(9): 1310.
- [5] 朱榆田, 李华强. 基于深度强化学习的孤岛微电网故障区域判定[J]. 计算机仿真, 2021, 38(7): 78.
- [6] 孟子超, 杜文娟, 王海风. 基于迁移学习深度卷积神经网络的配电网故障区域定位[J]. 南方电网技术, 2019, 13(7): 25.
- [7] 王伟强, 张晖, 金凤. 四维坐标系下区域电网网络拓扑建模仿真[J]. 计算机仿真, 2020, 37(11): 109.
- [8] 梁宇宾, 张耀宇, 谭家祺, 等. 基于随机矩阵理论的配电网状态分析与故障定位[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(3): 65.

- [9] 谢李为,李勇,罗隆福,等. 基于距离矩阵与分支系数的配电网故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2180.
- [10] 陈巨龙, 薛毅, 王健, 等. 采用同步电机对系统提升新能源电网低电压穿越能力的仿真与试验[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(5): 47.
- [11] 童晓阳, 张绍迅. 基于灰色关联度的配电网故障区段定位与类型识别方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 113.
- [12] 刘文杰, 舒勤, 韩晓言. 基于广义 S 变换和 TEO 的配电网故障定位方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(1): 12.
- [13] 宋国兵, 侯俊杰, 郭冰. 基于主动探测式的混合 MMC 直流输电系统单端量故障定位[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 730.
- [14] 冯泽彬, 张雪松, 汪湘晋, 等. 基于主动探测的直流微电网故障区段辨识与快速恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 183.

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发行,邮发代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的

贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。近年还被 JST 日本科学技术振兴机构数据库(日)和 Pж(AJ)文摘杂志(俄)等国外数据库收录。

为及时刊载上述技术领域的最新研究动态,推广研发成果,推动研究与应用的紧密结合,欢迎各高校相关课题组及团队和科研技术人员等向本刊投稿,本刊不收取任何版面费或审稿费等费用!

《电机与控制应用》官网: <http://www.motor-abc.cn/djykyz/home>.

扫码关注
《电机与控制应用》
微信公众号

