

# 基于 Hausdorff 距离的光伏漏电流监测方法

韩少华<sup>1</sup>, 毛王清<sup>1</sup>, 葛萱<sup>1</sup>, 许磊<sup>1</sup>, 陈肯<sup>1</sup>, 梁睿<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司宿迁供电分公司, 江苏 宿迁 223800;

2. 中国矿业大学 电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**与带有隔离变压器的大型光伏系统相比,分布式光伏的功率与体积较小,且为了提高工作效率,在设计时多采用非隔离型逆变器,但也因此产生了会危害配网系统安全的光伏漏电流。以单相全桥结构的光伏系统为例,详细分析了光伏漏电流的产生机理,随后分析了光伏漏电流进入配电网后的波形特征,并在此基础上提出了一种基于 Hausdorff 距离的光伏漏电流监测方法,简单高效地解决了光伏漏电流监测与保护困难的问题。最后对提出的方法进行仿真分析,验证了所提方法的可行性。

**关键词:**非隔离型;分布式光伏;逆变电路;漏电流监测;Hausdorff 距离

**中图分类号:**TM464 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25210

## A PV Leakage Current Monitoring Method Based on Hausdorff Distance

HAN Shaohua<sup>1</sup>, MAO Wangqing<sup>1</sup>, GE Xuan<sup>1</sup>, XU Lei<sup>1</sup>, CHEN Ken<sup>1</sup>, LIANG Rui<sup>2</sup>

(1. *Suqian Power Supply Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suqian 223800, Jiangsu, China;*

2. *School of Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China*)

**Abstract:** Compared with large photovoltaic systems with isolation transformers, distributed photovoltaic systems have small power and volume. In order to improve efficiency, non-insulated inverters are often used in design, but photovoltaic leakage current endangering system safety is also generated. Taking the single-phase full-bridge photovoltaic system as an example, the generation mechanism of photovoltaic leakage current was analyzed in detail through in-depth discussion of the problem of photovoltaic leakage current. Subsequently, the waveform characteristics of the photovoltaic leakage current entering the distribution network were analyzed, and a photovoltaic leakage current monitoring method based on Hausdorff distance was proposed, which simply and efficiently solved the problem of photovoltaic leakage current monitoring and protection. Finally, the feasibility of the proposed method was verified by simulation analysis.

**Key words:** non-isolated; distributed PV; inverter circuit; leakage current monitoring; Hausdorff distance

由于能源的短缺与生态环境的恶化,发展新型清洁能源已成为 21 世纪全世界的热点话题<sup>[1]</sup>。太阳能以其可再生、分布广泛、清洁无污染等优点成为新能源领域的新星<sup>[2]</sup>。伴随着分布式光伏系统的逐渐普及,光伏系统产生的漏电流的监测问题<sup>[3]</sup>成为众多学者与机构的研究热点。

光伏漏电流的监测问题是有源配电网在日常运行中必须解决的一个问题。过大的光伏漏电流进入配电网后,会给电网系统带来严重的电

磁干扰,甚至造成安全事故<sup>[4-5]</sup>。目前,关于光伏漏电流产生机理的理论研究已较为成熟。文献[6-8]对各种常见的单相光伏系统进行了研究,深入分析了不同拓扑结构下漏电流的产生过程与流电路径,并从拓扑结构优化、无源参数设计、设备选型等方面给出了一些漏电流抑制方法;文献[9-10]研究了拓扑结构的调制方法对于光伏漏电流的影响,从调制策略的角度分析了不同拓扑结构漏电流产生的差异,对光伏漏电流的监测与抑

**基金项目:**江苏省宿迁市指导性科技项目(Z2021145);国网宿迁供电公司本部 2022 年研究项目(SGJSSQ00KJJS2200251);

江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金(重大科技示范)(BE2022609);国家自然科学基金面上项目(52077215)

**作者简介:**韩少华(1990—),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为分布式新能源接入与消纳等,Email:hanshaohua9044@163.com

制方法的研究有参考意义。

光伏漏电流的检测与提取是漏电流监测的前提。光伏漏电流由于其高次谐波分量较大且相关特性较为复杂,在检测方面较为困难。文献[11]提出了一种接入可调变阻器的光伏漏电流检测方法,该方法可精确检测工频与低频谐波的漏电流信号,但无法对高频漏电流进行采样。文献[12]基于振荡电路原理,提出了一种基于铁氧体材质耦合电感的光伏漏电流检测电路,该电路可实现漏电流回路的自检自校,且检测成本较低,但检测精度较低。文献[13]提出了一种基于坐标变换的光伏漏电流检测方法,通过分析光伏漏电流与剩余电流之间的差异,利用正交化分解的方法提取出了电流中的光伏漏电流成分,该方法可准确提取光伏漏电流的工频分量,但对于高频分量的提取还有待研究。

在光伏漏电流监测方面,文献[14]提出了一种通过提取不同频次谐波进行漏电流监测的方法,该方法在对硬件的带宽和精度要求较低的前提下,能够准确地监测到漏电流的各谐波幅值,且不会导致继电保护装置误动作,解决了当前工程应用中漏电流检测以及保护困难问题。文献[15-16]提出了一种基于微扰法的漏电流监测方法。该方法通过漏电流进入配电网前后相角差值的变化,完成了漏电流的监测与故障定位,效果较好,但该方法分析故障时所需参数较多,实际使用时有较大困难,存在一定局限性。文献[17]提出了基于物联网的漏电流监测方法,该方法利用漏电流智能检测终端进行漏电流检测,操作起来简单方便,但成本较高,难以在实际中投入应用。

本文以最常见的单相全桥结构的光伏系统为例,建立系统的等效模型,深入分析光伏漏电流的产生机理,并基于漏电流进入配电网后的波形特征提出一种基于 Hausdorff 距离的光伏漏电流监测方法,简单、有效地解决了漏电流监测与保护困难的问题,并通过 Matlab/Simulink 软件进行仿真验证,仿真结果证明了方法的有效性。

### 1 非隔离型光伏系统漏电流机理研究与分析

本文以最为传统的单相全桥逆变结构的光伏并网系统为例,分析单相光伏并网系统的漏电流产生机理<sup>[18-19]</sup>。典型的单相光伏并网系统的拓

扑结构如图1所示。

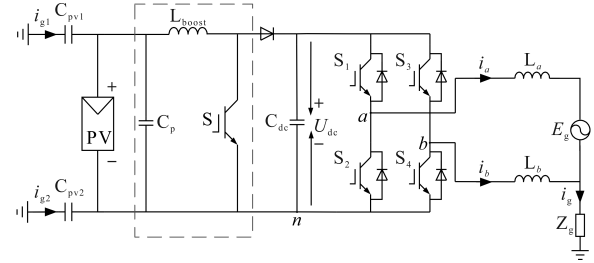


图1 单相光伏并网系统

Fig.1 Single-phase photovoltaic grid-connected system

图1中虚线框部分为 Boost 升压电路,该部分实现对光伏阵列的输出电压的升压以及光伏组件的最大功率点跟踪,升压电路后面为逆变电路,该部分完成了直流电到交流电的转换并实现光伏系统的并网。图中,  $C_p$  和  $L_{boost}$  分别为 Boost 升压电路的电容和电感,  $U_{dc}$  为经 Boost 电路升压后的逆变器直流侧的输入电压,  $C_{dc}$  为逆变器直流侧并联大电容,  $C_{pv1}$  和  $C_{pv2}$  分别为光伏板的正极与负极对大地的寄生电容,  $S_1 \sim S_4$  为逆变器的4个带有反并联二极管的 IGBT,  $L_a$  和  $L_b$  为各自桥臂的滤波电感,  $Z_g$  为光伏系统的接地阻抗,  $i_a$  和  $i_b$  为逆变器两个输出端的输出电流,  $E_g$  为电网电压,  $i_g$  为整个系统产生的共模漏电流,  $i_{g1}$  和  $i_{g2}$  分别为流过光伏板正、负极寄生电容的漏电流,  $a, b$  两点与参考点  $n$  之间的电位差分别用  $u_{an}$  和  $u_{bn}$  来表示。

在逆变器工作时,开关管  $S_1$  和  $S_2, S_3$  和  $S_4$  通断状态互补。在  $S_1$  导通时刻,  $u_{an}$  此时的电位为逆变器的直流侧输入电压  $U_{dc}$ , 在  $S_2$  导通时刻,  $a$  点与  $n$  点直接相接,  $u_{an}$  的电压值为 0。同样的,在开关管  $S_3$  导通时刻,  $u_{bn}$  的电压值为  $U_{dc}$ , 在  $S_4$  导通时刻,  $u_{bn}$  的电压值为 0。由此可见,逆变器的两个输出端与参考点之间的电压  $u_{an}$  和  $u_{bn}$  的取值都在 0 和  $U_{dc}$  两种电平之间变化。

为了便于研究,引入共模电压  $U_{cm}$  和差模电压  $U_{dm}$  的概念,并将其定义为

$$\begin{cases} U_{cm} = (u_{an} + u_{bn})/2 \\ U_{dm} = u_{an} - u_{bn} \end{cases} \quad (1)$$

根据图1的电路结构,联立式(1),可以列出以下回路方程:

$$\begin{cases} u_{an} = L_a di_a/dt + E_g + i_g Z_g + \frac{1}{C_{pv1}} \int i_{g1} dt + U_{dc} \\ u_{bn} = L_b di_b/dt + i_g Z_g + \frac{1}{C_{pv2}} \int i_{g1} dt \\ i_a + i_b = i_{g1} + i_{g2} = i_g \end{cases} \quad (2)$$

根据式(2),可以得到如图2所示的电路结构模型。

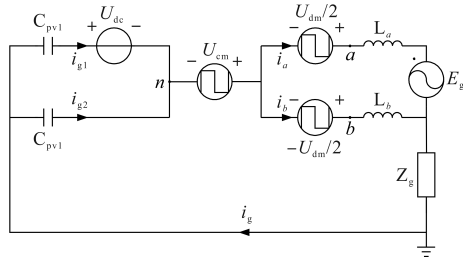


图2 等效电路结构模型

Fig.2 Equivalent circuit structure model

利用戴维宁定理对图2进行等效简化后,可以得到最终系统的共模电流模型,如图3所示。

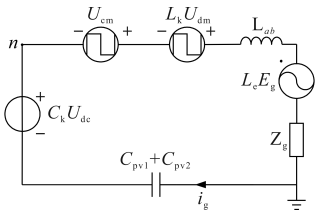


图3 单相系统的等效共模电流模型

Fig.3 Equivalent common-mode current model of a single-phase system

在图3中,经过计算,  $C_k, L_k, L_{ab}$  和  $L_e$  可以定义如下:

$$\begin{cases} C_k = C_{pv2} / (C_{pv1} + C_{pv2}) \\ L_k = (L_a - L_b) / [2(L_a + L_b)] \\ L_{ab} = L_a L_b / (L_a + L_b) \\ L_e = L_b / (L_a + L_b) \end{cases} \quad (3)$$

由图3可知,单相并网系统逆变电路的共模电流模型中有4个激励源,分别是  $L_e E_g, C_k U_{dc}, U_{cm}$  和  $L_k U_{dm}$ 。其中,激励源  $L_e E_g$  来自于电网的电压,其频率为工频50 Hz,为逆变器直流侧电压;  $C_k U_{dc}$  为直流量;共模电流的高频分量来自于  $U_{cm}$  和  $L_k U_{dm}$ ,大小与逆变器的滤波电感的分布情况相关,若能够实现电感的完全对称分布 ( $L_a=L_b$ ),在理论上可消除这种激励源。

根据电路相关理论,在电容上流过的电流大小与电容本身容值以及作用在它两端的电压有关,其关系式为

$$i_{cm} = C_{pv} dU_{cm} / dt \quad (4)$$

式中:  $U_{cm}$  为共模电流模型中的总共模电压。

由于在光伏系统中光伏板两端的寄生电容  $C_{pv}$  通常为 nF 级,工频分量  $L_e E_g$  和直流分量  $C_k U_{dc}$  作用在上面产生的漏电流几乎可以忽略不计。若忽略二者影响,  $U_{cm}$  的表达式为

$$U_{cm} = U_{cm} + L_k U_{dm} \quad (5)$$

当滤波电感分布对称时,式(5)就可以被简化为下式:

$$U_{cmt} = U_{cm} \quad (6)$$

从式(4)和式(6)可以确定,要从根源上抑制漏电流,必须保持共模电压的恒定。当共模电压实现恒定时,共模电压的变化率为0,理论上使得系统中流过电容的电流为0,即无共模漏电流的产生。

三相全桥逆变结构的光伏系统的漏电流产生机理与单相光伏系统一致,本文不再进行阐述。

## 2 基于 Hausdorff 距离的漏电流监测方法

在分布式光伏系统的实际应用中,由于系统中一些设备的参数会受到环境的影响而改变,或是在日常维护过程中操作人员的一些误动作,可能使整个光伏系统的漏电流受到较大的影响,甚至会超过安全运行标准。为了运行安全,电网系统需要安装监测装置对异常光伏设备进行定位甄别。本文提出一种基于 Hausdorff 距离的漏电流波形匹配算法<sup>[20]</sup>,有效解决了电网系统中的漏电流监测问题。

### 2.1 光伏并网漏电流波形特征

以中性点直接接地的电力系统为例,光伏系统接入配电网后光伏漏电流回路如图4所示。图中,  $TA_1$  和  $TA_2$  为漏电流互感器; QF 为系统总开关; PV 为一个接入电力系统的三相光伏系统;  $I_A, I_B, I_C, I_N$  分别为 A, B, C 三相电流和中性线电流;  $I_0$  为下游线路中因各种原因产生的正常漏电流;  $I_{cm}$  为光伏系统产生的漏电流。

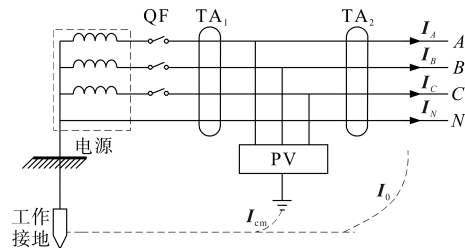


图4 光伏并网系统等效示意图

Fig.4 Equivalent schematic diagram of photovoltaic grid-connected system

为分析光伏系统漏电流进入配电网的情况,忽略光伏系统区段下游产生的漏电流,即  $I_0 = 0$ 。假设光伏系统实现了对漏电流的完全抑制,即没有漏电流产生时,由电路原理可知,通过  $TA_1$  和  $TA_2$  互感器一次侧的电流相量和等于零,即

$$I_A + I_B + I_C + I_N = 0 \quad (7)$$

此时,两个互感器铁心中的磁通相量和均为零,其二次侧不产生感应电动势,即没有漏电流进入电网。

当光伏系统未能实现漏电流的完全抑制,即有漏电流进入电网时,此时下游互感器TA<sub>2</sub>无法感知到其上游区段的漏电流信号,所以通过TA<sub>2</sub>一次侧的电流相量和为0,而TA<sub>1</sub>位于光伏并网点上游,通过TA<sub>1</sub>一次侧的电流相量和不再为0,产生了漏电流I<sub>cm</sub>,即

$$I_A + I_B + I_C + I_N = I_{cm} \quad (8)$$

由上述分析可知,当区段内无光伏漏电流流入时,光伏系统并网点两侧电网中的漏电流序列波形基本一致,相似度极高。当光伏系统产生漏电流并流入电网时,两侧的漏电流波形会产生较大差异,其相似度随着区段内流入漏电流的增大而变小。

根据以上漏电流的波形特征,在漏电流的监测和保护中,可以对漏电流传感器的采集数据进行波形绘制,把漏电流幅值作为纵坐标,时间作为横坐标,每一个漏电流数据点当作波形的特征点,从而利用图形相似度识别法进行漏电流监测。

## 2.2 Hausdorff距离算法原理

在图形相似度判别中有相似度判别和距离判别两种。相似度判别不能在方向上反映两组波形同时变化的情况,在受到干扰时容易导致误判。而距离判别考虑两组波形间的整体特征差异<sup>[21]</sup>,所以可应用于配电网的电流分析研究中<sup>[22]</sup>。

为了提升配电网监测端采集到的电流信号的利用率,本文根据分布式光伏系统接入配电网的漏电流波形特征,提出了一种基于Hausdorff距离算法的漏电流监测方法。

对于两组有限的集合 $M=\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ ,  $N=\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ ,  $M$ 与 $N$ 之间的距离计算公式为

$$H(M, N) = \max[h(M, N), h(N, M)] \quad (9)$$

其中

$$h(M, N) = \max_{a_i \in M} \min_{b_j \in N} |a_i - b_j| \quad (10)$$

$$h(N, M) = \max_{b_j \in N} \min_{a_i \in M} |a_i - b_j| \quad (11)$$

式(10)表示,对于集合 $M$ 中任一点 $a_i \in M$ ,首先计算该点与集合 $N$ 中的 $n$ 个元素之间的距离,通过逐个比较得出距离的最小值;然后对于集合 $M$ 中的 $m$ 个元素依次计算最小距离值,最终得到 $m$

个最小的距离值,这 $m$ 个值中的最大值就是集合 $M$ 到 $N$ 的单向Hausdorff距离。式(11)与之同理。

式(9)表示取 $h(M, N)$ 和 $h(N, M)$ 之间的较大者作为整体的Hausdorff距离,它代表了两个集合之间的幅值的不匹配度,它的值越大,表明两个集合之间差异越大,在电网系统中就表示电网系统中的漏电流幅值越大。

## 2.3 监测判据与流程

实际工作时,每一个分布式并网点线路的两端都会设置监测节点,配电网正常运行时,设置于配电台区内的各监测节点将同步采集漏电流的波形信号并上传至监测终端,终端通过计算机识别技术先将各监测节点的地址信息统一编码,再通过各监测节点上传的漏电流波形信息确定产生漏电流的并网点,最终定位产生漏电流的光伏设备。

对于某线路区段两端的监测节点所测得的漏电流信号 $i_{1i}, i_{1j}$ ,由式(9)可以得出它们之间的Hausdorff距离:

$$H(i_{1i}, i_{1j}) = \max[h(i_{1i}, i_{1j}), h(i_{1j}, i_{1i})] \quad (12)$$

$H(i_{1i}, i_{1j})$ 代表两个监测节点测量所得的漏电流波形之间的差异程度,它的大小反映了区段内漏电流的大小。

假定某一线路内有 $k$ 个监测节点,则节点之间可形成不匹配矩阵 $H_{1 \times (k-1)}$ :

$$H_{1 \times (k-1)} = [H_{1,2} \cdots H_{1,j} \cdots H_{1,k-1,k}] \quad (13)$$

式(13)中每个元素表示相邻的两个监测节点所采集到的漏电流信号的Hausdorff距离。假设矩阵 $H_{1 \times (k-1)}$ 中最大的元素为 $H_{\max}$ ,第二大的元素为 $H'_{\max}$ ,定义两者之间不匹配度之商为

$$h = \frac{H_{\max}}{H'_{\max}} \quad (14)$$

由 $h$ 的定义可知,每一个不匹配矩阵都对应一个不匹配度之商,即在某一配电线路中,每种运行状态都对应一个 $h$ 。 $h$ 能够反映不同并网点两端的漏电流之间的联系,在不同的配电系统中,可以设置不同的阈值 $H_{\text{set}}$ 和 $h_{\text{set}}$ ,则可精准判断出 $H_{\max}$ 所处的区段,即漏电流超标的区段,如下式所示:

$$\begin{cases} H_{\max} > H_{\text{set}} \\ h > h_{\text{set}} \end{cases} \quad (15)$$

当满足式(15)的条件时,保护装置动作,将此光伏系统从配电网中切除,并发出报警信号。

本方法具体的漏电流监测流程如图5所示。

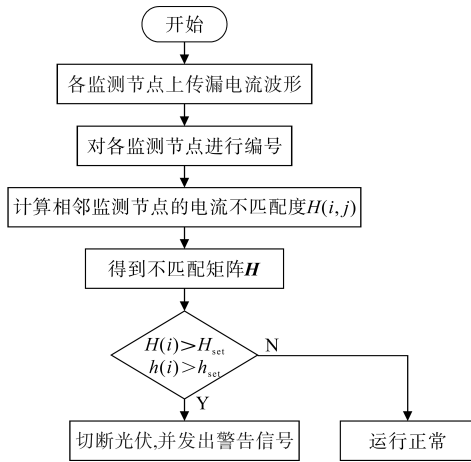


图5 漏电流监测判据流程图

Fig.5 Flowchart of leakage current monitoring criteria

### 3 仿真与现场实验验证

#### 3.1 仿真分析

为了验证 Hausdorff 距离监测方法在实际应用中的有效性与可靠性,本文利用 Matlab/ Simulink 软件搭建了三相全桥逆变电路的光伏系统并网模型,并以此光伏并网模型为基础,搭建了如图6所示的5个光伏接入配电网的系统模型。

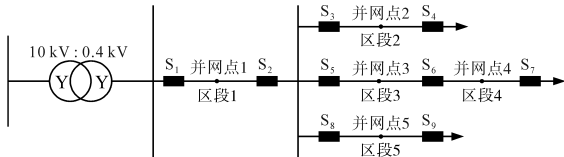


图6 光伏系统并网模型

Fig.6 Grid connection model of photovoltaic system

图6中, $S_1 \sim S_9$ 为9个漏电流监测装置,本实验中,阈值  $H_{set}$  设定为0.043,  $h_{set}$  设定为2。

光伏模型的参数设置为:光伏板输出功率  $P=8\text{ kW}$ ,温度为稳定  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,辐照强度  $1000\text{ W/m}^2$ ,Boost 升压电路侧电容  $C_p=1\text{ }\mu\text{F}$ ,储能电感  $L_{boost}=6\text{ mH}$ ,光伏板最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)采用扰动观察法,逆变器直流侧输入电压  $U_{dc}=600\text{ V}$ ,直流侧并联电容  $C_{dc}=2\text{ mF}$ ,逆变器开关元件采用带有反并联二极管的 IGBT,并利用 SPWM 技术进行调制,逆变器每个输出端线路电阻  $R_l=0.005\text{ }\Omega$ ,滤波电感  $L_a=L_b=L_c=2.5\text{ mH}$ ,电网电压设定为频率  $50\text{ Hz}$ 、电压幅值  $311\text{ V}$  的正弦交流电,电网对地电阻  $R_g=1\text{ }\Omega$ ,寄生电容  $C_{pv1}=C_{pv2}=200\text{ nF}$ 。逆变器采用双极性调制方法,调制频率  $20\text{ kHz}$ 。

为了测试在不同并网节点发生故障时,漏电流监测系统是否能够将漏电流超标的并网节点鉴

别出来,本文分别在5个并网点设置了因寄生电容过大导致的漏电流超标现象,监测结果如表1所示。

表1 不同工况下的监测结果

Tab.1 Monitoring results under different working conditions

故障区段	$H(1,2)$	$H(3,4)$	$H(5,6)$	$H(6,7)$	$H(8,9)$	$h$
无	0.003	0.037	0.024	0.026	0.036	1.028
1	<b>0.085</b>	0.024	0.023	0.026	0.024	3.542
2	0.002	<b>0.103</b>	0.025	0.027	0.038	2.711
3	0.004	0.038	<b>0.093</b>	0.029	0.038	2.447
4	0.005	0.038	0.033	<b>0.128</b>	0.038	3.368
5	0.002	0.038	0.025	0.027	<b>0.103</b>	2.711

表1中,加粗的数字即为该工况下各监测点之间 Hausdorff 距离的最大值。

从表1中可以看出,当漏电流超标现象发生在区段1时,监测装置  $S_1$  和  $S_2$  之间测出的波形不匹配度  $H(1,2)$  最大,超过了阈值0.043,不匹配度之商  $h$  也超过了阈值2,根据判据最终可以确定区段1中漏电流超标。同样地,当区段2~区段5中漏电流超标时也都能定位成功。

以区段1和区段2为例,图7和图8分别是当并网节点1的光伏产生漏电流过大时,并网节点1和并网节点2两端的监测装置测得的光伏漏电流波形图。

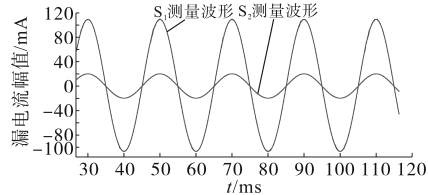


图7 并网节点1两端测量点漏电流波形

Fig.7 Leakage current waveforms of measurement

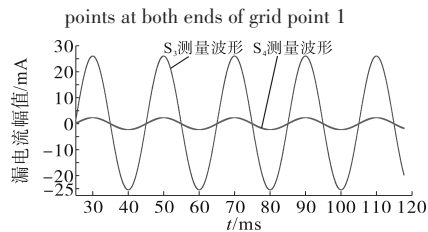


图8 并网节点2两端测量点漏电流波形

Fig.8 Leakage current waveforms of measurement points at both ends of grid point 2

由上述波形对比可知,当并网节点1处的光伏产生漏电流过大时,其上游的光伏漏电流信号幅值远大于下游的漏电流幅值,并且幅值之差已经超过了设定阈值,所以系统会将并网节点1的光伏切除。而并网节点2处的光伏虽然也产生了一定漏

电流,导致两侧的漏电流波形产生了一定差异,但是两侧漏电流波形的Hausdorff距离仍在阈值以下,所以并网节点2处的光伏仍可正常并网运行。

根据上述仿真结果与分析可知,本文所提出的基于Hausdorff距离的光伏漏电流监测方法的监测结果不受光伏漏电流所在区段的影响,且灵敏度较高。

### 3.2 现场实验验证

为了进一步验证本文所提光伏漏电流监测方法的实际应用效果,在某光伏并网示范点进行了现场实验,现场情况如图9所示。



图9 现场实验图

Fig.9 Field experiment diagram

受现场条件的限制,本实验选取了同一条线路的3个光伏并网节点进行漏电流监测,每个光伏并网节点并入的光伏容量大约是8 kW。

在保证配电系统正常运行的情况下,利用外接电容的方法增大并网节点处光伏的寄生电容,再用本文所提方法对并网节点两端的漏电流进行监测,得到的监测结果如表2所示。

表2 现场实验的监测结果

Tab.2 Monitoring results of field experiments			
运行状态	光伏位置	$H(i_L, i_R)$	$h$
正常运行	并网节点1	0.034	1.205
	并网节点2	0.041	
	并网节点3	0.037	
并网节点1的光伏漏电流超标	并网节点1	0.094	2.765
	并网节点2	0.034	
	并网节点3	0.029	
并网节点2的光伏漏电流超标	并网节点1	0.027	2.609
	并网节点2	0.107	
	并网节点3	0.041	
并网节点3的光伏漏电流超标	并网节点1	0.028	2.794
	并网节点2	0.034	
	并网节点3	0.095	

根据表2可知,在正常运行状态下,Hausdorff距离不匹配度之商 $h$ 小于阈值2,当某并网节点的光伏出现漏电流超标时,此运行状态对应的 $h$ 超过阈值2,然后再根据每个并网节点的Hausdorff距离值即可定位出具体的漏电流超标的光伏的位置。

上述实验结果表明,本文所提出的光伏漏电流监测方法能够精准监测每个并网节点处光伏的漏电流情况,且拥有较高的灵敏度。

## 4 结论

本文通过研究单相全桥结构的光伏系统的漏电流产生机理,对光伏漏电流进入配电网后的波形特征进行了分析,并在此基础上提出了一种基于Hausdorff距离的光伏漏电流监测方法。与已有的漏电流监测方法相比,本方法仅需要通过提取光伏并网节点两端的漏电流信号并进行对比即可实现漏电流监测,过程中不需要通过复杂的计算,也不需要获取电流信号波形外的其他电流信息,避免了因复杂计算而产生的较大误差,极大地简化了整个监测流程,在工程实践中有较大的实用价值。

除了光伏系统外,本方法也可以适用于其他分布式电源、用电设备等系统产生的漏电流的监测。对于配电网系统,若合理配置监测单元,本方法也可初步实现配电网发生接地故障时的区段定位。

### 参考文献

- [1] 吴莉,卢奇秀,李丽旻,等.谱写新时代能源发展新篇章[N].中国能源报,2022-09-26(001).  
WU Li, LU Qixiu, LI Limin, et al. Writing a new chapter in energy development in the new era[N]. China Energy News, 2022-09-26(001).
- [2] 李美成,高中亮,王龙泽,等.“双碳”目标下我国太阳能利用技术的发展现状与展望[J].太阳能,2021(11):13-18.  
LI Meicheng, GAO Zhongliang, WANG Longze, et al. Development status and prospect of solar energy utilization technology in China under goal of emission peak and carbon neutrality[J]. Solar Energy, 2021(11):13-18.
- [3] 李倩.含光伏电源的配用电系统漏电保护的研究[D].天津:河北工业大学,2019.  
LI Qian. Study on leakage protection of distribution system with photovoltaic power[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2019.
- [4] 黎国扬.非隔离型光伏并网逆变器的漏电流抑制研究[D].成都:西南交通大学,2021.  
LI Guoyang. Research on leakage current suppression of non-isolated photovoltaic grid connected inverter[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [5] 栗遇春,葛翔,李发亮,等.低电压穿越条件光伏逆变器模型预测控制研究[J].电气传动,2020,50(3):16-21.  
LI Yuchun, GE Xiang, LI Faliang, et al. Research on model pre-

- dictive control of PV inverter under low voltage ride through condition[J]. *Electric Drive*, 2020, 50(3): 16-21.
- [6] 湛欣骥. 新型单相单级光伏逆变器研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2021.  
CHEN Xinqi. Research on a new single-phase single-stage photovoltaic inverter[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [7] 管成功. 一种可抑制漏电流的单相Sepic型逆变器研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2021.  
GUAN Chenggong. Research on a single-phase Sepic inverter capable of suppressing leakage current[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [8] 肖华锋, 王晓标, 张兴, 等. 非隔离光伏并网逆变技术的现状与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(4): 1038-1054, 1397.  
XIAO Huafeng, WANG Xiaobiao, ZHANG Xing, et al. State-of-the-art and future trend of transformerless photovoltaic grid-connected inverters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(4): 1038-1054, 1397.
- [9] YUBA R K, GRAHAM E T, XIAO G C, et al. Performance comparison of single-phase transformerless PV inverter systems[C]// *Proceedings of 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. Tampa, FL, USA: IEEE, 2017.
- [10] 王宝基, 张兴, 曹仁贤. 双三电平光伏逆变器的拓扑与控制策略研究[J]. *电气传动*, 2021, 51(20): 3-9, 23.  
WANG Baoji, ZHANG Xing, CAO Renxian. Research on the topology and control strategy of the dual three-level photovoltaic grid-tied inverter[J]. *Electric Drive*, 2021, 51(20): 3-9, 23.
- [11] 陈信勇, 赖峥. 光伏逆变器残余漏电流与方阵绝缘阻抗的检测研究[J]. *环境技术*, 2021, 39(5): 168-171, 176.  
CHEN Xinyong, LAI Zheng. Study on residual current detection and array insulation resistance of photovoltaic inverter[J]. *Environmental Technology*, 2021, 39(5): 168-171, 176.
- [12] 王进城, 岳三玲, 孙荣川. 基于铁氧体电感的漏电流检测电路设计[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(13): 60-64.  
WANG Jincheng, YUE Sanling, SUN Rongchuan. Design of leakage current detection circuit based on ferrite inductor[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2019, 42(13): 60-64.
- [13] 舒成维, 王承民, 谢宁. 一种基于坐标变换的剩余电流提取方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(15): 111-119.  
SHU Chengwei, WANG Chengmin, XIE Ning. A method used to extract different components of residual current based on coordinate transformation[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(15): 111-119.
- [14] 康劲松, 张凤岗. 基于谐波提取的非隔离型并网光伏逆变器漏电流检测研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(7): 2113-2122, 2391.  
KANG Jinsong, ZHANG Fenggang. Research on leakage current detection of transformerless grid-connected photovoltaic inverter based on harmonic extraction[J]. *Proceedings of CSEE*, 2020, 40(7): 2113-2122, 2391.
- [15] 张磐, 张愉, 丁一, 等. 基于微扰法的低压有源配电网故障定位方法[J]. *中国电力*, 2018, 51(12): 63-71.  
ZHANG Pan, ZHANG Yu, DING Yi, et al. Fault location for low voltage active distribution network based on perturbation method[J]. *Electric Power*, 2018, 51(12): 63-71.
- [16] 张家田, 段亚清. 基于微扰法的低压有源配电网故障定位方法研究[J]. *电工材料*, 2020(2): 34-36, 41.  
ZHANG Ji Tian, DUAN Yaqing. Research on fault location method of low voltage active distribution network based on perturbation method[J]. *Electrical Engineering Materials*, 2020(2): 34-36, 41.
- [17] 海涛, 邓樟波, 韦文, 等. 基于物联网的电气设备漏电监测系统[J]. *自动化与仪表*, 2021, 36(2): 32-38.  
HAI Tao, DENG Zhangbo, WEI Wen, et al. Electrical leakage monitoring system for electrical equipment based on IoT[J]. *Automation & Instrumentation*, 2021, 36(2): 32-38.
- [18] 张兴, 吴孟泽, 王明达, 等. 单相光伏级联多电平逆变器漏电流抑制与功率均衡控制综述[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(9): 202-215.  
ZHANG Xing, WU Mengze, WANG Mingda, et al. Review on leakage current suppression and power balance control of single-phase photovoltaic cascaded multilevel inverter[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(9): 202-215.
- [19] 张洋, 张敏, 张蔚. 非隔离型光伏并网逆变器漏电流分析[J]. *电力安全技术*, 2021, 23(3): 24-27.  
ZHANG Yang, ZHANG Min, ZHANG Wei. Analysis on leakage current of non-isolated photovoltaic[J]. *Electric Safety Technology*, 2021, 23(3): 24-27.
- [20] 牟浩东, 王敬华, 方善忠, 等. 基于Hausdorff距离的漏电流故障监测方法[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2021, 42(5): 189-195.  
MU Haodong, WANG Jinghua, FANG Shanzhong, et al. Fault monitoring method of leakage current based on Hausdorff distance[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2021, 42(5): 189-195.
- [21] 邵文权, 程畅, 卫晓辉, 等. 利用暂态电流Hausdorff距离的谐振配电网故障选线方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(8): 33-42.  
SHAO Wenquan, CHENG Chang, WEI Xiaohui, et al. Fault line selection scheme using the Hausdorff distance of transient current in resonant distribution networks[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(8): 33-42.
- [22] 李振兴, 王朋飞, 王新, 等. 基于幅值特征和Hausdorff距离的配电网故障定位方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(7): 169-177.  
LI Zhenxing, WANG Pengfei, WANG Xin, et al. Fault location method of distribution network based on amplitude feature and Hausdorff distance[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(7): 169-177.

收稿日期: 2023-06-28

修改稿日期: 2023-08-24