

DOI: 10.7667/PSPC171110

一种基于坐标变换的剩余电流提取方法

舒成维, 王承民, 谢宁

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 从安规角度分析了非隔离型光伏并网逆变器系统中普遍存在的共模电流问题, 并将其分解成漏电流和剩余电流。以全桥电路为例建立了共模电压回路分析模型, 并探寻影响漏电流和剩余电流大小的因素及其两者的特征。根据两者的特征提出一种基于坐标变换的提取方法, 同时因为该方法需要构建虚拟垂直信号, 所以引入一种基于二阶广义积分器的正交信号发生器(Second-order Generalized Integrator Quadrature Signals Generator, SOGI-QSG)完成信号处理。实验证明: 该方法能精确计算各种成分, 并能自适应于电网频率, 具有实用价值。

关键词: 光伏并网逆变器; 漏电流; 剩余电流; 帕克变换; SOGI-QSG

A method used to extract different components of residual current based on coordinate transformation

SHU Chengwei, WANG Chengmin, XIE Ning

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The common mode current in non-isolated photovoltaic grid-connected inverter is analyzed from the point of view of safety regulation and decomposed into leakage current and residual current. A common mode voltage loop analysis model is established based on full bridge and influential factors and features of leakage current and residual current are researched. A method based on coordinate transformation is proposed according to their features. At the same time, virtual vertical signals need to be constructed for the method, so a kind of SOGI-QSG is introduced to process the signals. Experimental results show that the method can accurately calculate the value of each component and adapt to different grid frequencies automatically, so it has promoted value.

Key words: photovoltaic grid-connected inverter; leakage current; residual current; Park; SOGI-QSG

0 引言

光伏并网发电技术因为自身独有的绿色无污染等优势, 近些年得到了大力推广, 在主要经济体中占据了一席之地。近年来, 我国因环境治理和温室气体排放等原因也在大力推广光伏发电, 最近又提出了光伏扶贫计划, 使得光伏发电逐渐走进千家万户。

并网逆变器是光伏发电的关键环节, 一般有隔离型和非隔离型两种类型。隔离型逆变器实现了隔离, 同时具有可以提供不同电压等级和直流分量抑制等优点, 但是逆变器体积大、重量大且效率低, 即使采用高频隔离方案效率仍然较低; 而非隔离型逆变器则拥有转换效率高, 体积、重量和成本低的优势, 现在得到广泛应用。非隔离型逆变器直接与电网连接, 面板对地等效电容、逆变器和电网三者形成回路, 必然会导致共模电流的增大, 带来人身安全隐患。有很多专家学者从各个方面研究改进:

文献[1-2]从拓扑结构入手提出了新的结构; 文献[3]从调制方式入手, 保持共模电压的恒定, 从而减少漏电流; 文献[4]从控制着手作补偿, 减少共模电流; 文献[5]提出了改变滤波电感、增加共模并联回路分流、调整矢量组合和改变开关频率等策略抑制共模电流; 文献[6]总结了常见的单相机拓扑类型, 并提出了四种抑制途径; 文献[7]对漏电流抑制技术作了一定程度的总结和展望, 基本上也是从拓扑结构、调制方式和改变系统参数的角度; 文献[8]采用有限集预测改进。以上各种方式或因为专利或因为效率或因为器件一致性等原因均有局限性, 而且也无法彻底消除共模电流, 所以准确检测共模电流的大小及变化量, 及时保护可以避免安全事故。

本文从安规标准的角度分析了光伏系统中共模电流成因及影响因素, 并对共模电流成分进行分析, 同时提出一种正交化分解方法, 可以提取电流的不同成分, 为人身安全保护提供准确支撑, 测试一台

3 kW 样机, 将仪器检测的数据导入 Matlab 中作数据分解, 并与算法分离的数据作对比验证该方法的准确性。

1 漏电流分析

1.1 非隔离型光伏并网系统

光伏并网系统一般由光伏组件、逆变器和电网组成, 结构如图 1 所示。

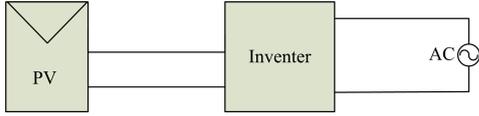


图 1 光伏并网系统示意图

Fig. 1 Photovoltaic grid connected system diagram

面板正负极 PV+/PV-对地存在共模电压, 同时由于光伏阵列的面积较大, 面板阵列和大地之间存在等效电容 C_{pv} , 如图 2 所示。

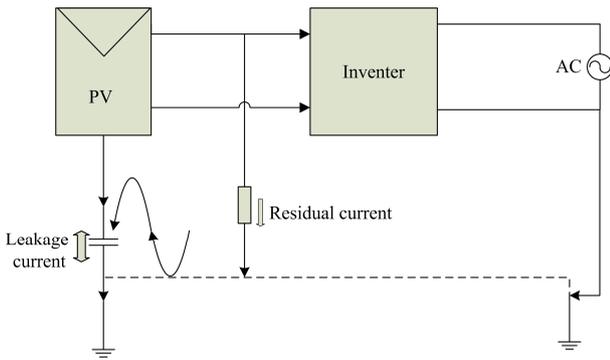


图 2 共模回路示意图

Fig. 2 Common-mode loop diagram

PV 正负端共模电压在 C_{pv} 上形成漏电流(Leakage Current), 而当人触碰到机器时, 通过人体形成的电流称之为剩余电流(Residual Current)。因为涉及到人身安全所以各个国家均有针对 Leakage Current 和 Residual Current 保护的标准, 以 VDE 0126-1-1/A1 标准为例, 其中对此有明确的保护要求, 具体见表 1 所示。

表 1 漏电流保护阈值

Table 1 Leakage current protection threshold

类型	阈值/mA	断开时间/s
Residual current	30	0.3
	60	0.15
	150	0.04
Leakage current	300	0.3

注: 测试采用 2 kHz 带宽的电流检测设备。

如图 2 所示, 漏电流和剩余电流产生的源头都是共模电压, 和通常说的共模电流一致, 区别是角

度不同。下面分别探寻两种电流的影响因素。

1.2 共模电压

文献[1-3,6,9]都从各自分析角度出发建立了单相全桥并网逆变器的共模等效模型, 但是或忽略了开关管对大地的寄生电容和电网线路阻抗等参数, 或忽略了面板对地等效电阻, 都限制了模型的通用性。

综合考虑所有因素后, 以传统的单相全桥逆变器为例, 建立简化模型如图 3 所示, 其中 V_{ao} 、 V_{bo} 表示全桥逆变器交流输出 a、b 点对直流负母线 o 点的电压, V_L 表示输出滤波电感上的压降, V_g 表示电网电压, V_{pv-} 表示 PV 负端对地的共模电压, V_{pv+} 表示 PV 正端对地电压, V_{pv} 表示 PV 正端对负端电压差。

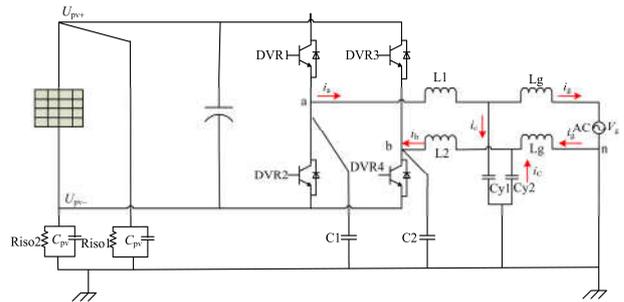


图 3 共模回路分析模型

Fig. 3 Common-mode loop analysis model

由 KVL 定律可以得到:

$$\begin{cases} V_{ao} + V_{pv-} = V_{L1} + V_{Lga} + V_g \\ V_{bo} + V_{pv-} = -V_{L2} - V_{Lgb} \\ V_{pv+} = V_{pv-} + V_{pv} \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可以得到 PV 正负端对地电压。

$$\begin{cases} V_{pv-} = -\frac{1}{2}(V_{ao} + V_{bo}) + \frac{1}{2}(V_{L1} - V_{L2}) + \frac{1}{2}(V_{Lga} - V_{Lgb}) + \frac{1}{2}V_g \\ V_{pv+} = -\frac{1}{2}(V_{ao} + V_{bo}) + \frac{1}{2}(V_{L1} - V_{L2}) + \frac{1}{2}(V_{Lga} - V_{Lgb}) + \frac{1}{2}V_g + V_{pv} \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} V_{Lx} = L_x \frac{dI_x}{dt} \\ V_{Lgx} = L_{gx} \frac{dI_{gx}}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

通常设计上 $L_1=L_2$, $L_{ga}=L_{gb}$, V_{ao} 和 V_{bo} 是开关频率的方波信号, 所以由式(2)可以看出 PV 端共模

电压中有三种成分: 开关频率成分、电网频率成分和直流成分。安规标准测试只考虑 2 kHz 以内的信号, 逆变器的开关频率通常都远大于 2 kHz, 所以分析漏电流和剩余电流保护时只考虑电网频率成分和直流成分即可。

1.3 Leakage Current 影响因素

从图 2 中可以看到漏电流形成的原因是 PV+/PV- 存在对地的共模电压, 同时面板对地存在等效电容和等效电阻, 漏电流大小取决于 PV+/- 的共模电压大小、等效电容大小和等效电阻大小。共模电压上一节已经分析过, 本节重点讨论等效电容和等效电阻。

光伏电池板是由若干块 cell 串并联组成, 如图 4 所示。

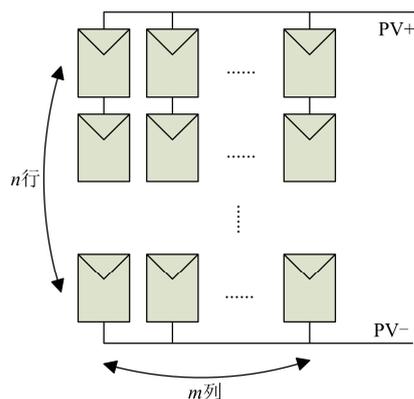


图 4 PV 面板阵列

Fig. 4 PV array diagram

最终的面板等效电容和等效电阻是由每片单元的电容和电阻串并联形成。

每片单元的寄生电容也并不是一个固定值, 根据天气环境、安装条件和面板材料不同也会有所不同。寄生电容也不止一个, 一般会在多个地方产生寄生电容。如图 5 所示。

C1 是电池板表面与电池板内部的寄生电容, C2 是电池板内部与屋顶之间的寄生电容。在下雨或者潮湿环境下, $C1 \gg C2$; 而在晴天或者干燥的环境下, C1 几乎可以忽略不计。C2 的值一般比较小, 受环境影响也比较小。电容值可以根据以下公式进行计算。

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A / d \quad (4)$$

式中: ϵ_0 为电容率; ϵ_r 为介电常数, 与介质材料有关; A 为两面板之间的有效面积; d 为两面板之间的距离。

文献[10]研究显示电容量可以达 200 nF/kW, 另外电容量受空气介电常数影响很大, 在湿度较大时, 电容值会大幅增加。

等效电阻影响因素也很多, 变化非常大。文献[11]建立了面板模型, 并以一台实际机器为例观测了多种因素对等效电容和电阻的影响, 如图 6 所示。从中也可以看到等效电容和电阻变化范围很大, 并不是一个固定值。

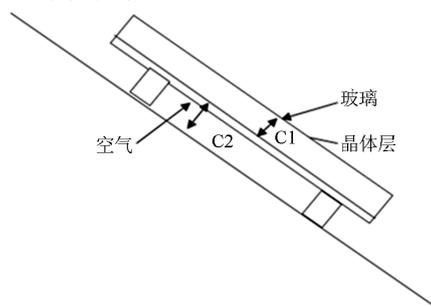


图 5 PV 面板对地等效电容

Fig. 5 Equivalent capacitance of PV array to earth

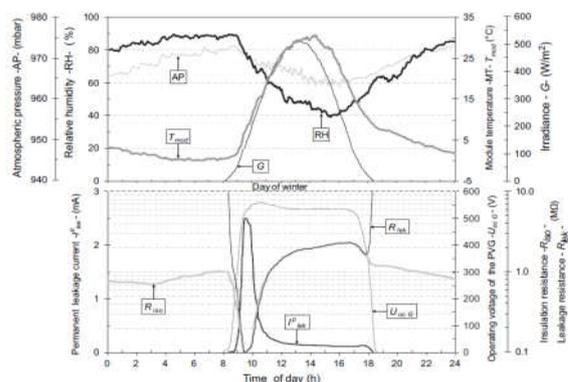


图 6 等效电阻和电容大小影响因素

Fig. 6 Factors of equivalent resistance and capacitance

理论上 Leakage current 可以通过计算得出, 但实际上如文献[5]分析, 漏电流的大小不仅和寄生电容和共模电压有关, 还和滤波电感、Y 电容和 BUS 电容大小有关, 同时还有面板对地等效电阻的影响, 通过理论计算误差很大。

1.4 Residual Current 影响因素

从图 2 可以看出来, PV+/- 共模电压经人体电阻产生的电流大小取决于共模电压以及人体等效电阻大小, 是引起人体危险的决定性因素, 电流越大, 保护时间就越短, 具体标准见表 1。

从上面的分析可以发现漏电流和剩余电流在不同条件下变化很大, 给准确检测带来不小的挑战。

2 剩余电流检测

2.1 检测电路

通用的 GFCI 模块如图 7 所示, 包括振荡电路、

滤波比例放大电路和保护电路。

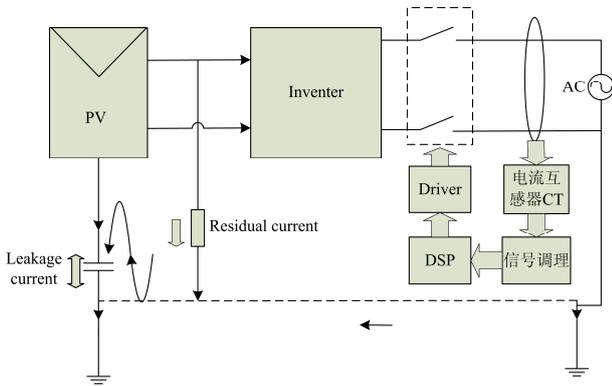


图 7 GFCI 检测电路

Fig. 7 GFCI detection circuit

电路基本原理：没有发生漏电或触电故障的情况下，由 KCL 可知，通过漏电流互感器 CT 一次侧的电流相量和等于零，即

$$\vec{I}_L + \vec{I}_N = 0 \quad (5)$$

这使得 CT 铁芯的磁通的相量和也为 0，即

$$\vec{\phi}_L + \vec{\phi}_N = 0 \quad (6)$$

这样电流互感器的二次侧没有感应电动势产生，系统保持正常。当被保护电路发生漏电故障或有人触电时，由于漏电电流的存在，使得通过电流互感器一次侧各相电流的相量和不再等于零，产生了漏电流：

$$\vec{I}_L + \vec{I}_N = \vec{I}_K \quad (7)$$

这使得 CT 铁芯的磁通的相量和也不等于 0，即：

$$\vec{\phi}_L + \vec{\phi}_N = \vec{\phi}_K \quad (8)$$

在铁芯中出现了交变磁通。电流互感器的二次侧在交变磁通作用下，就有感应电动势产生，经过信号调理电路送到 DSP 处理器 AD 端口，DSP 检测该信号的变化量，当达到预定值时，切断输出继电器，从而实现保护。

2.2 成分提取

结合图 3 和检测电路原理分析可知，检测电路检测的信号是包括 Leakage Current 和 Residual Current 的合成电流，也就是通常说的共模电流。

有众多文献^[12-17]提出了很多保护原理及方法，有采用专用的保护设备或者采用极为复杂的算法提取，不管是成本还是空间要求都较高，实现方法也较为复杂，调节阈值也不方便。

其中文献[13]针对光伏系统提出一种剩余电流的计算方法，方向基本正确，方法实现也较为简单，但是共模回路分析模型过于简单，忽略了电网频率成分不合理，同时没有分析清楚漏电流成分及影响

因素，关于算法则犯了两个错误。

1) 忽略了初始值的影响。光伏发电系统对地阻抗不是无穷大，从几十千欧到几兆欧不等，主流面板配置开路电压为 500~1 000 V，简单计算，阻性电流从 10 mA 到 100 μ A 左右，并不能简单忽略。

2) 没有考虑到漏电流是会随着外部条件变化而变化的。从图 6 可以看出面板等效电容和电阻并不是一个固定值，会受多种因素影响，其中湿度影响最大。

如图 8 左侧所示， I_C 是初始容性电流，当有人体接触机器是会产生 ΔI_R ，漏电流检测电路检测到的两者的矢量和 I_{RMS} ，根据前后两次的漏电流可以计算出剩余电流 ΔI_R 。但实际情况需要考虑初始值和变化量，如右侧示意图，由两次检测到的漏电流可以计算出剩余电流，如下式：

$$\sqrt{I_{RMS}^2 - I_{RMS}^2} = \sqrt{(2 \cdot I_C \cdot \Delta I_C + 2 \cdot I_R \cdot \Delta I_R + \Delta I_C^2) + \Delta I_R^2} \quad (9)$$

很显然，比真正的剩余电流 ΔI_R 大的多，如果采用这个结果必然会引起误动作。

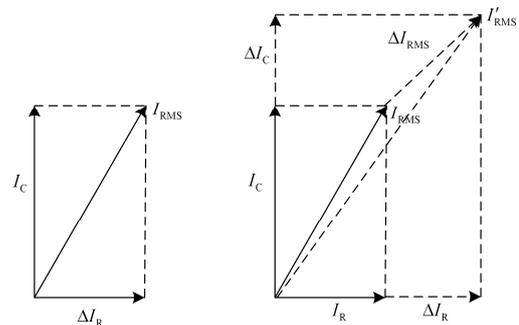


图 8 共模电流矢量合成图

Fig. 8 Common-mode current vector synthesis

本文在以上文献的工作基础上，提出了一种新的检测方法，可以准确地计算出共模电流的各成分大小，为准确保护提供可靠依据。

前文已经分析过逆变器检测到的共模电流其实是容性电流和阻性电流合成的向量。从漏电流的组成成分特征着手，分离其不同成分。

$$I_S = \frac{V_S}{Z_C} + \frac{V_S}{Z_R} + \frac{V_C}{Z_R} \quad (10)$$

式中： V_C 是共模电压中的直流成分； V_S 是共模电压中的交流成分，和市电同频率。交直流电压在容性负载和阻性负载上会产生三种电流成分：阻性直流 I_{dc} 、阻性交流 I_R 和容性交流 I_C ，其中 I_C 和 I_R 电流相位相差 90° 。

从 1.3 节分析可以看出 V_S 是与市电电压同频的

交流成分, 可以利用这个特性对 I_S 作市电周期平均, 即可得到阻性直流成分大小。

$$I_{dc} = \sum_{i=0}^N I_{S(i)} = \frac{V_C}{Z_R} \quad (11)$$

式中, N 为各市电周期内的采样点数。

由式(10)和式(11)可以得到式(12)。

$$I_K = I_S - I_{dc} = I_R \cos \theta + I_C \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \quad (12)$$

式中: I_R 为共模电压交流成分在等效电阻上形成的阻性电流峰值; I_C 为共模电压交流成分在等效电容上形成的容性电流峰值。

从式(12)可以发现, I_K 只有阻性交流和容性交流两种成分电流, 其中容性电流超前阻性交流 90° 。

将 I_K 移相 90° , 得到信号 I_{K90} , 以 I_K 为 α 轴, I_{K90} 为 β 轴, 构建 α - β 坐标。

$$\begin{aligned} I_K &= I_R \cos \theta + I_C \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) = I_R \cos \theta - I_C \sin \theta \\ I_{K90} &= I_R \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) + I_C \cos \theta = I_R \sin \theta + I_C \cos \theta \end{aligned} \quad (13)$$

通过 Park 旋转坐标变换

$$\begin{bmatrix} \overline{I_d} \\ \overline{I_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I_K} \\ \overline{I_{K90}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, θ 为市电电压角度。

由式(13)和式(14)联合, 可以得到以下结果。

$$\begin{aligned} I_d &= I_R \\ I_q &= I_C \end{aligned} \quad (15)$$

式中: I_d 正好是阻性电流峰值; I_q 是容性电流的峰值。通过 Park 坐标变换即可得到两种电流成分的峰值。检测不同市电周期的电流成分, 就可以知道变化量, 漏电流保护算法就可以根据三种电流成分的大小及变化量作出准确判断及保护。

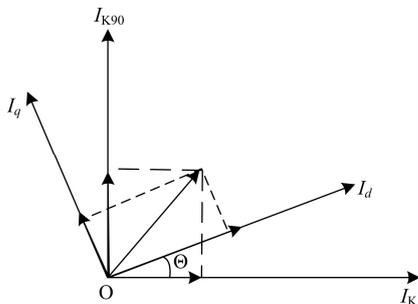


图 9 电流坐标变换

Fig. 9 Coordinate transformation of current

2.3 数据处理

2.2 节中提到的分解方法有两个关键点: 延迟

($\pi/2$)移相滤波和 Park 坐标变换的角度, 都需要对采样信号的准确处理。文献[12]提出延迟采样的方法, 但是这个需要多占用采样资源, 而且不同市电周期延迟时间还不固定, 适应性差, 文献[18-22]提出了多种市电电压相位信号处理方法, 综合实际效果和实现所需资源, 本文采用基于二阶广义积分器的正交信号发生器(SOGI-QSG)来解决上述问题。滤波器结构如图 10 所示。

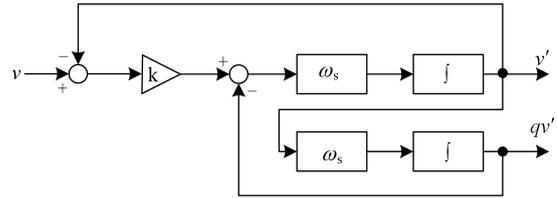


图 10 正交信号发生器结构

Fig. 10 Structure of SOGI-QSG

qv' 相对于输入信号 v 移相 90° 。传递函数如下:

$$H(s) = \frac{qv'(s)}{v(s)} = \frac{k\omega_s^2}{s^2 + k\omega_s s + \omega_s^2} \quad (16)$$

式中: ω_s 为谐振频率, 可以根据逆变器锁相环输出信号动态调整, 自适应不同电网频率; k 为调节系数, 系统品质因素 $Q=1/k$, 可以根据要求调整。

滤波器的幅频和相频响应特性如下式:

$$|H(s)| = \frac{\omega_s}{\omega} \frac{k\omega_s \omega}{\sqrt{(k\omega_s \omega)^2 + (\omega^2 - \omega_s^2)^2}} \quad (17)$$

$$\angle H(s) = \arctan\left(\frac{\omega^2 - \omega_s^2}{k\omega_s \omega}\right) - \frac{\pi}{2}$$

由上式可以看到, 当输入信号频率等于 ω_s 时, 幅度增益为 1, 相位延迟 $\pi/2$ 。

综合考虑动态响应和稳态性能, 取 $\omega_s=2\pi f=314$, $k=0.5$ 。则:

$$H(s) = \frac{qv'(s)}{v(s)} = \frac{4.935e04}{s^2 + 157.1s + 9.87e04} \quad (18)$$

采用 tustin 离散得到 Z 域传递函数:

$$H(z) = \frac{(3.072e-05)z^2 + (6.144e-05)z + (3.072e-05)}{z^2 - 1.992z + 0.9922} \quad (19)$$

注: 采样时间 $50 \mu s$ 。

频率响应如图 11 所示, 左侧是 s 域响应图, 右侧是 z 域响应图。

从图 11 可以看出离散后的传递函数特性不变, 对 50 Hz 信号增益为 1, 相位延迟 $\pi/2$, 对其他频率信号有衰减作用, 符合设计预期。

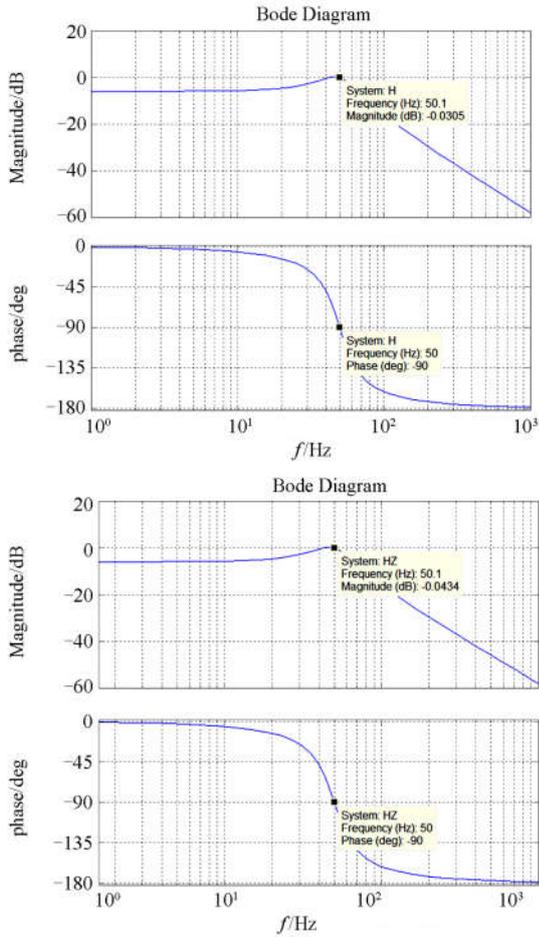
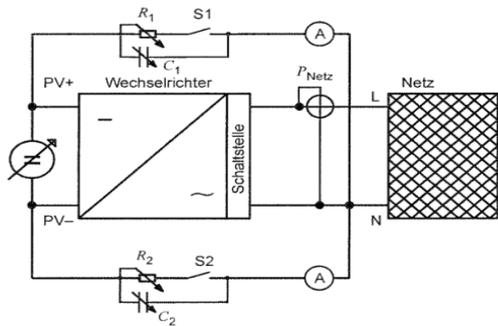


图 11 滤波器频率响应

Fig. 11 Bode diagram of DSOGI-QSG

3 实验验证

以一台3 kW单相逆变器为例，以实际测试数据和算法分离后的数据作对比，验证提取算法是否有效。测试设备连接如图12。



注: C1, C2: 面板正负极对地共模电容; R1, R2: 模拟人体电阻;

Netz: 电网, 测试时用 AC Source 代替

图 12 漏电流测试设备连接图

Fig. 12 Test equipment connection of leakage current protection

先后分别投入电容和电阻可以得到如图 13、图 14 波形。

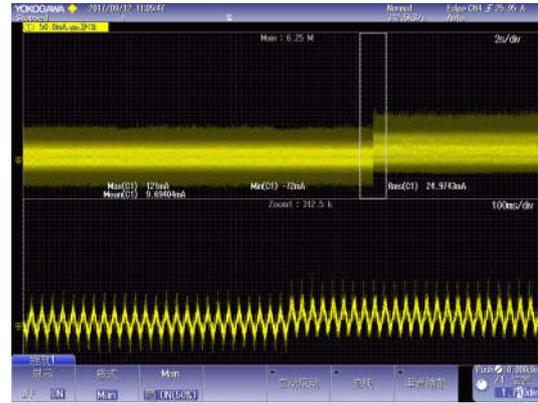


图 13 PV+对地漏电流波形

Fig. 13 Scope of leakage current between PV+ and earth

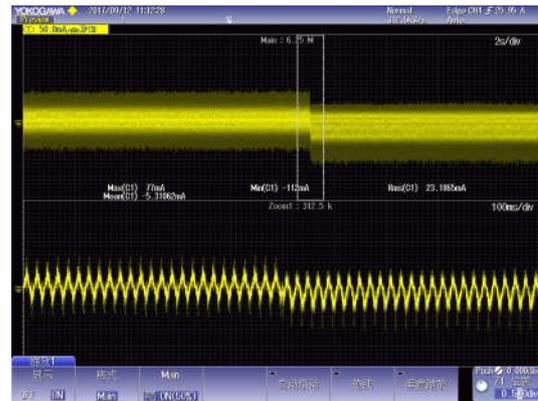


图 14 PV-对地漏电流波形

Fig. 14 Scope of leakage current between PV- and earth

对电流信号做频率分析结果如图 15、图 16。

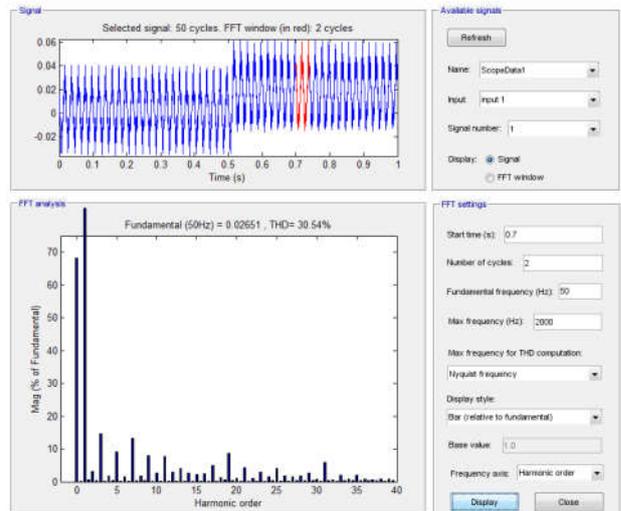


图 15 PV+对地漏电流频谱

Fig. 15 Spectrum of leakage current between PV+ and earth

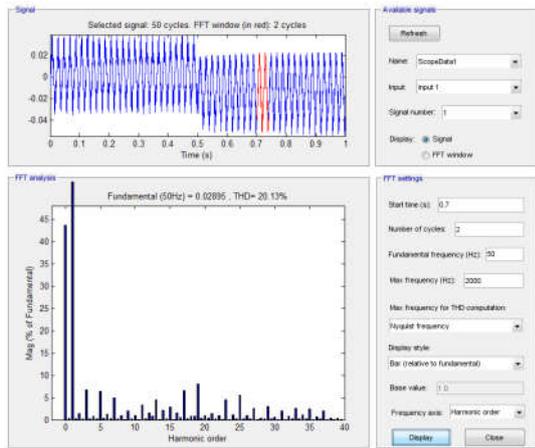


图 16 PV-对地漏电流频谱

Fig. 16 Spectrum of leakage current between PV- and earth

可以看出直流分量和 50 Hz 分量占主要成分, 也验证了前述章节分析的准确性。

为了进一步量化对比算法有效性, 设置如下测试条件: $V_{mpp}=400\text{ V}$, $C1$ 或者 $C2$ 选择 $11.67\ \mu\text{F}$, 调节滑动变阻器, 选择七个电阻点。

逆变器软件算法分解出三种电流成分后发送出来, 另外同时保存示波器数据, 将其导入 Matlab 中用同样的分解算法处理得到三种电流成分, 分别对比三种电流成分的误差, PV+对地外接电容数据如表 2—表 4 所示, PV-对地接电容数据如表 5—表 7 所示, 表中电容单位均为 μF , 电流单位均为 mA 。

表 2 PV+对地平均值对比

Table 2 Comparison of average value between PV+ and earth

外接电容	算法分解值	Malab 解析值	误差
11.7	3	-0.80	-3.80
	20.8	18.30	-2.50
	38.5	36.65	-1.85
	56	53.50	-2.50
	72.5	70.30	-2.20
	89.5	85.80	-3.70
	105.5	101.50	-4.00

表 3 PV+对地 D 轴分量对比

Table 3 Comparison of D-axis component between PV+ and earth

外接电容	算法分解值	Malab 解析值	误差
11.7	4.09	3.60	-0.49
	18.32	15.40	-2.92
	31.66	29.00	-2.66
	44.96	42.50	-2.46
	58.39	59.30	0.91
	68.18	63.50	-4.68
	70.55	66.00	-4.55

表 4 PV+对地 Q 轴分量对比

Table 4 Comparison of Q-axis component between PV+ and earth

外接电容	算法分解值	Malab 解析值	误差
11.7	18.78	16.00	-2.78
	16.92	12.60	-4.32
	17.91	13.80	-4.11
	18	14.20	-3.80
	15.93	16.40	0.47
	14.98	14.00	-0.98
	14.06	14.50	0.44

表 5 PV-对地平均值对比

Table 5 Comparison of average value between PV- and earth

外接电容	算法分解值	Malab 解析值	误差
11.7	-2.6	-1	1.60
	12.5	15.6	3.10
	29.3	33.2	3.90
	55	55.2	0.20
	62.2	67	4.80
	79.6	84.5	4.90
	97.5	101.2	3.70

表 6 PV-对地 D 轴分量对比

Table 6 Comparison of D-axis component between PV- and earth

外接电容	算法分解值	Malab 解析值	误差
11.7	4.35	2	-2.35
	17.8	18.2	0.40
	31.3	31.8	0.50
	38.6	34.4	-4.20
	55.6	52.2	-3.40
	72	74	2.00
	87	82.8	-4.20

表 7 PV-对地 Q 轴分量对比

Table 7 Comparison of Q-axis component between PV- and earth

外接电容	算法分解值	Malab 解析值	误差
11.7	6.35	6.65	0.30
	14.4	15.2	0.80
	18	14.75	-3.25
	16.85	14.5	-2.35
	17.8	13.5	-4.30
	15.7	16.8	1.10
	13.4	15.5	2.10

从表 2—表 7 可以看出, 通过软件分离算法得到的值和实测数据基本吻合, 误差大部分在 $\pm 3\text{ mA}$ 以内, 最大值不超过 $\pm 5\text{ mA}$, 漏电流检测电路设计测量范围是 $\pm 500\text{ mA}$, 误差百分比小于 1%, 且一

致性很好,可以用于保护。误差主要是由滤波器、DSP 采样误差和计算误差引起,可以针对改进,进一步提高精度。

4 结论

1) 本文分析了共模电流产生的原因,并从安规角度分析了漏电流和剩余电流的区别,从产生因素上分析了漏电保护面临的挑战,并以实际数据证明。

2) 分析了共模电流的三种成分,提出分解方法,理论推导证明有效性,并以实际数据对比验证,简单易行,易于实现,且能适应不同电网频率变化,最后以实际样机数据测试对比证明有效性。

3) 本文提出的方法虽然是针对只有基波成分的共模电流分解方法,但是完全可以推广到含有多次谐波的共模电流分解,针对各次谐波成分分别提取再合成,同样可以得到各电流成分大小。

参考文献

- [1] 张兴, 孙龙林, 许频, 等. 单相非隔离型光伏并网系统中共模电流抑制的研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(9): 1202-1208.
ZHANG Xing, SUN Longlin, XU Po, et al. Research on common-mode current reduction of nonisolated single-phase grid-connected photovoltaic systems[J]. Acta Enerclae Solaris Sinica, 2009, 30(9): 1202-1208.
- [2] 马琳, 金新民. 无变压器结构光伏并网系统共模漏电流分析[J]. 太阳能学报, 2009, 30(7): 883-888.
MA Lin, JIN Xinmin, Leakage current analysis of a single phase transformerless PV inverter connected to the grid[J]. Acta Enerclae Solaris Sinica, 2009, 30(7): 883-888.
- [3] 肖华锋, 谢少军, 陈文明, 等. 非隔离型光伏并网逆变器漏电流分析模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(18): 9-14.
XIAO Huafeng, XIE Shaojun, CHEN Wenming, et al. Study on leakage current model for transformerless photovoltaic grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(18): 9-14.
- [4] 高金辉, 刑倩. 无差拍控制的非隔离型并网逆变器漏电流分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 120-125.
GAO Jinhui, XING Qian. Deadbeat control for transformerless PV grid inverter leakage current analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 120-125.
- [5] 苏娜, 徐德鸿. 非隔离光伏并网逆变器系统的地电流分析与验证[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 30-35.
SU Na, XU Dehong. Analysis and verification of ground current for grid connected transformerless photovoltaic inverter system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 30-35.
- [6] 唐婷, 石祥花, 黄如海, 等. 非隔离型光伏并网逆变器漏电流抑制机理分析与改进[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 25-31.
TANG Ting, SHI Xianghua, HUANG Ruhai, et al. Mechanism analysis and optimization of leakage current elimination for transformerless photovoltaic grid-connected inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 25-31.
- [7] 郭伟扬, 郭小强. 无变压器非隔离型光伏并网逆变器漏电流抑制技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 1-8.
WU Weiyang, GUO Xiaoqiang. A review of novel leakage current suppression techniques for transformerless photovoltaic inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(18): 1-8.
- [8] 陈素华. 有限集预测控制减少三相电压源逆变器共模漏电流方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 136-141.
CHEN Suhua. Finite set control model predictive control method to reduce common-mode leakage for three-phase voltage source inverter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 136-141.
- [9] ROBERTO G Eugenio G, JESUS L, et al. Transformerless single-phase multilevel-based photovoltaic inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2694-2702.
- [10] KEREKES T, TEODORESCU R, BORUP U. Transformerless photovoltaic inverters connected to the grid[C] // Applied Power Electronics Conference, APEC 2007-Twenty Second Annual IEEE, February 25-March 1, 2007, Anaheim, USA: 1733-1737.
- [11] HERNÁNDEZ J C, VIDAL P G, MEDINA A. Characterization of the insulation and leakage currents of PV generators: relevance for human safety[J]. Renewable Energy, 2010, 35(3): 593-601.
- [12] 蔡志远, 庞佳, 陈廷辉. 基于剩余电流和漏电阻抗的漏电保护方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 61-64.
CAI Zhiyuan, PANG Jia, CHEN Tinghui. Research on method of leakage current protection based on residual current and leakage impedance[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 61-64.
- [13] 童树卫, 余志勇, 钱彬. 一种用于非隔离光伏并网逆变器漏电流检测的电路设计与实现[J]. 电子科学技术

- 2015, 2(2): 162-167.
TONG Shuwei, YU Zhiyong, QIAN Bin. One kind of leakage current detection circuit design and realization for transformerless PV grid-connected inverter[J]. Electronic Science & Technology, 2015, 2(2): 162-167.
- [14] 熊晓祎, 肖先勇, 左金威, 等. 触电事故特征改进近似熵检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 1-6.
XIONG Xiaoyi, XIAO Xianyong, ZUO Jinwei, et al. Electrical shock feature detection method based on improved approximate entropy[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 1-6.
- [15] 李奎, 陆俭国, 武一. 消除漏电保护死区的新技术及其试验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(20): 28-32.
LI Kui, LU Jianguo, WU Yi. Technology of eliminating dead zone of leakage current protection and its examining method[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(20): 28-32.
- [16] 李春兰, 苏娟, 杜松怀, 等. 基于小波分析和 BP 神经网络的触电信号检测模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 2): 130-134.
LI Chunlan, SU Juan, DU Songhuai, et al. Detecting model of electric shock signal based on wavelet analysis and BP neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(S2): 130-134.
- [17] 熊晓祎, 肖先勇, 赵恒. 基于自适应算法的触电事故电流检测[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 139-144.
XIONG Xiaoyi, XIAO Xianyong, ZHAO Heng. Adaptive algorithm based electrical shock current detection method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 139-144.
- [18] 刘述奎, 韩莹, 李奇, 等. 基于双二阶广义积分锁相环的燃料电池并网系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 122-128.
LIU Shukui, HAN Ying, LI Qi, et al. Fuel cell grid-connected system based on dual second order generalized integrator phase locked loop[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 122-128.
- [19] 赵贵龙, 曹玲玲, 祝龙记. 基于光伏并网逆变系统的改进锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 108-112.
ZHAO Guilong, CAO Lingling, ZHU Longji. Improved PLL design of PV grid inverter system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 108-112.
- [20] 郝来迎, 王金富, 侯川川, 等. 基于三阶广义积分的锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 184-189.
XI Laiying, WANG Jinfu, HOU Chuanchuan, et al. Design of phase locked loop based on third-order general-integrator[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 184-189.
- [21] 徐青青, 陈莹, 刘莉, 等. 一种双正弦幅值积分器解耦锁相环的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 132-137.
XU Qingqing, CHEN Ying, LIU Li, et al. Design of decoupled double sinusoidal amplitude integrator phase-locked loop[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 132-137.
- [22] 杜佳玮, 杨鹏, 史旺旺, 等. 考虑频率变化的基于 DFT 单相数字锁相环的椭圆拟合方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 85-90.
DU Jiawei, YANG Peng, SHI Wangwang, et al. A novel single-phase digital phase-locked loop based on DFT considering frequency variation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 85-90.

收稿日期: 2017-07-24; 修回日期: 2017-09-24

作者简介:

舒成维(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏逆变器; E-mail: scw_1982@163.com

王承民(1970—), 男, 博士, 教授, 研究领域为电力系统规划及经济运行、电力市场等; E-mail: wangchengmin@sjtu.edu.cn

谢宁(1973—), 女, 博士, 副教授, 研究领域为电力系统分析与控制, 电力系统经济运行、智能电网等。E-mail: xiening@sjtu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)