

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210380

基于谐波特性的光伏孤岛与低电压穿越同步检测方法

赵禹灿¹, 姜旭², 孙福寿², 葛路明³, 孙铭徽¹, 于淼¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310015; 2. 国网吉林省电力有限公司, 吉林 长春 130000;
3. 中国电力科学研究院(南京分院) 江苏 南京 210000)

摘要: 针对光伏并网系统孤岛保护与低电压穿越之间的运行冲突问题, 提出了一种基于谐波特性的光伏孤岛与低电压穿越同步检测方法。根据系统在并网、孤岛、电压扰动三种运行状态下谐波电压的不同, 用傅里叶级数定量分析了频谱泄漏对谐波检测的影响, 同时在考虑主电网背景谐波对谐波检测的影响后, 推导了谐波电压阈值的整定公式。在此基础上, 给出了同步检测实现方案及其算法流程, 并在仿真软件平台上验证。从“协鑫边昭光伏电站带边昭变孤岛试验”的数据中提取的谐波特性曲线进一步验证了所提的谐波电压阈值可以识别孤岛现象。理论分析、仿真实验以及现场实验都证明了所提的谐波电压阈值可以作为区分孤岛现象和电压暂态扰动现象的依据, 所提的基于谐波特性的同步检测方法可以有效协调光伏并网系统孤岛保护和低电压穿越两种功能。

关键词: 光伏; 并网; 孤岛保护; 低电压穿越; 背景谐波; 频谱泄漏; 同步检测

Simultaneous detection method for photovoltaic islanding and low-voltage-ride-through based on harmonic characteristics

ZHAO Yucan¹, JIANG Xu², SUN Fushou², GE Luming³, SUN Minghui¹, YU Miao¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China; 2. State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130000, China; 3. China Electric Power Research Institute (Nanjing Branch), Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to solve the operation conflict between islanding protection and low-voltage-ride-through of grid-connected photovoltaic system, a simultaneous detection method for photovoltaic islanding and low-voltage-ride-through based on harmonic characteristics is proposed. According to the differences of the system harmonic voltages among three operating states, i.e. grid-connected operation, islanding operation and voltage transient perturbation, the influence of spectrum leakage on harmonic detection is quantitatively analyzed by Fourier series. After the influence of the background harmonic in main grid is considered, the setting formula of the harmonic voltage threshold is derived. Based on that the simultaneous detection implementation scheme and its algorithm flow are given, which are verified on simulation software platform. The harmonic characteristic curve extracted from the data of “Islanding Operation Test of Xiexin-Bianzhao Photovoltaic Power Station Carried with Bianzhao Transformer” further verifies that the proposed harmonic voltage threshold can identify the islanding phenomenon. Both theoretical analysis and simulation experiments show that the proposed harmonic voltage threshold can be used as the basis to distinguish the islanding phenomenon from the voltage transient perturbation phenomenon. And the proposed simultaneous detection method based on harmonic characteristics can effectively coordinate the two functions of grid-connected photovoltaic system, i.e. islanding protection and low-voltage-ride-through.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902002).

Key words: photovoltaic; grid-connected; islanding protection; low-voltage-ride-through; background harmonic; spectrum leakage; simultaneous detection

0 引言

为了解决日益严峻的能源危机和环境问题^[1],

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0902002); 国网吉林省电力有限公司科技项目(SGJL0000DKJS1800321); 中国电力科学研究院南京分院科技项目(NYN51201900639)

新能源技术尤其是光伏发电技术近年来得到飞速发展^[2-3]。光伏电源具有布置灵活、不受地域限制、适用于分布式接入电网等优势^[4], 接入配电网中不仅可以有效缓解当地的电力紧张格局, 还能为光伏投资者带来收益^[5]。光伏电站的运行机理和常规发电机组存在较大差异, 大规模光伏电站并网势必会对电力系统的安全稳定运行带来严峻的挑战^[6-7]。为了

保证电网安全稳定运行, 光伏并网系统须同时具备孤岛保护和低电压穿越两种能力。

孤岛是指某一供电区域失去系统电源时, 由该区域的分布式电源继续向负荷供电, 从而形成一个独立不可控的自给式供电区域^[8-9]。而孤岛保护则是指当网侧断路器断开、系统处于孤岛状态时, 光伏电站应及时解列, 以保证人员设备安全^[10-11]。另一方面, 大量光伏发电系统接入电网以后, 因电网故障而快速将光伏切出电网会对电网系统造成严重的冲击, 影响系统的稳定性^[12]。因此光伏发电系统应具有低电压穿越能力。低电压穿越是指当网侧电压短时跌落时, 光伏电站应保持并网状态运行一段时间, 以维持电压与频率的稳定^[13]。这就带来了一个难题, 即当检测到公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)电压跌落时, 光伏并网系统如何选择低电压穿越或者孤岛保护动作。当光伏并网系统处于孤岛状态时, 执行低电压穿越操作不仅会影响孤岛检测效果, 而且还会对设备与人员造成伤害; 而当网侧电压发生暂态扰动时, 执行孤岛保护的停机动作会使低电压穿越失败^[14]。

为了避免这一矛盾, 目前我国电网的低电压穿越与孤岛检测并不是同步进行的, 而是在发生电压跌落时, 保持并网状态运行在国标规定的低电压穿越时间后再进行孤岛检测。然而, 根据 GB/T 19964—2012、IEEE Std. 1547.1—2020 等国内外标准^[15-23]的规定, 在 PCC 电压跌落以后, 孤岛保护要求系统在 2 s 内解列, 低电压穿越则要求系统保持 2 s 不脱网。显然上述执行方式优先保证光伏并网系统的低电压穿越能力, 而在孤岛保护动作时间上与各并网准则相悖。

为了使孤岛保护动作时间和低电压穿越时长均能符合并网准则, 光伏并网系统需要同时进行低电压穿越与孤岛检测, 对电压暂态扰动与孤岛状态进行准确而快速的区分, 然而目前对此鲜有研究。文献[14]提出了一种基于无功功率扰动的低电压穿越与孤岛同步检测算法, 但是该算法是基于网侧电压暂态扰动时频率不变这一前提的, 未考虑主电网在故障时的频率偏移。文献[24]提出了一种基于阻抗特性的孤岛保护和故障穿越协调运行方法, 但是需要外加 1.5 次谐波源来测取谐波阻抗, 不仅成本高, 而且会对电能质量产生影响。文献[25]利用负序电流注入实现孤岛保护和不平衡故障穿越, 但是未能实现三相对称故障时的低电压穿越。文献[26-27]把并网准则中所规定的低电压穿越曲线的上方区域划分为低电压穿越区域, 其下方区域划分为孤岛保护

区域, 未能从根本上解决两者的冲突问题, 依然有可能发生孤岛误判。文献[28]把低电压持续的时间作为区分孤岛现象和电压暂态扰动的依据, 这并不完全符合并网准则的要求。

针对上述问题, 本文根据孤岛前后和网侧电压跌落前后 PCC 谐波电压的变化特性差异, 提出了一种基于谐波特性的光伏孤岛与低电压穿越同步检测方法。该方法可以有效区分孤岛现象与网侧电压跌落现象, 进而执行不同操作, 保护人员与设备安全。

1 孤岛与电压暂态扰动的区分

1.1 不同故障类型的谐波特性分析

图 1 为 IEEE Std. 1547.1^[16]所提出的光伏并网系统经典模型, 本地负荷为 RLC 并联恒阻抗负载。为了分析方便, 本节假设主电网背景谐波为 0。由图 1 易求 h 次谐波的负载阻抗 Z_h , 其值为

$$Z_h = R // jh\omega_0 L // \frac{1}{jh\omega_0 C} \quad (1)$$

式中: R 、 L 、 C 为并联负载参数; $\omega_0 = 2\pi f_0$ 为工频对应的角频率。

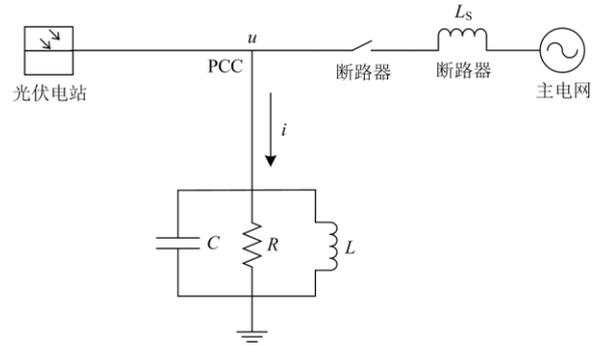


图 1 光伏并网系统经典模型

Fig. 1 Classic model of grid-connected PV system

在系统并网运行的情况下, 断路器闭合, PCC 的 h 次谐波电压与谐波电流满足式(2)。

$$\dot{U}_h' = \dot{I}_h' (Z_h // jh\omega_0 L_s) \quad (2)$$

式中: \dot{U}_h' 和 \dot{I}_h' 分别为并网状态下 PCC 电压和负载电流对应的 h 次谐波相量(有效值); L_s 为电网侧等效电感。

在孤岛运行的情况下, 断路器断开, 谐波电压与谐波电流之间的关系变为

$$\dot{U}_h'' = \dot{I}_h'' Z_h \quad (3)$$

式中, \dot{U}_h'' 和 \dot{I}_h'' 分别为孤岛状态下 PCC 电压和负载电流对应的 h 次谐波相量(有效值)。

由式(2)和式(3)可知, 孤岛发生前后谐波电压的比值为^[29]

$$K_h = \frac{|\dot{U}_h''|}{|\dot{U}_h'|} = \frac{|Z_h|}{|Z_h // jh\omega_0 L_s|} \quad (4)$$

因此, 孤岛运行时谐波电压(有效值)的理论值为式(5)。

$$U_h'' = K_h U_h' \quad (5)$$

因为主电网背景谐波为 0, 所以孤岛发生前负载的谐波电流全部由光伏电站提供。又因孤岛时刻光伏电站产生的谐波电流不能突变, 即 $i_h'' \approx i_h'$, 所以当 h 满足式(6)时, $K_h > 1$, 即 $|\dot{U}_h''| \geq |\dot{U}_h'|$ 。

$$1 < h \leq \bar{h} = \frac{1}{\omega_0} \sqrt{\frac{1}{LC} + \frac{1}{2L_s C}} \quad (6)$$

由式(6)可知, 孤岛发生以后, \bar{h} 次以下的谐波电压将增大, 这些谐波均可作为识别孤岛发生与否的判据。在实际运行的电网中, C 和 L_s 的值都很小, 通常有 $1/(\omega_0 C) \gg \omega_0 L_s$, 即 $\omega_0^2 L_s C \ll 1$, 因此 \bar{h} 的值会很大, 可选择用于孤岛判据的谐波频带很宽。当 C 或 L_s 趋向于 0 时, \bar{h} 趋向于无穷大, 此时, 任何次数的谐波均可作为孤岛判据。当不考虑因电压暂态扰动或其他原因而产生的孤岛误判时, 谐波电压检测法的原理可以表述为: 控制器实时监控 PCC 的 h 次谐波电压有效值, 一旦超过阈值, 即判为孤岛。

在网侧电压发生暂态扰动的情况下, 断路器依旧闭合, 扰动后经过一段时间 PCC 电压会达到新的稳态, 此时 L_s 与本地负荷并未断开连接, 因而谐波电压与谐波电流满足式(7)。

$$\dot{U}_h'' = i_h'' (Z_h // jh\omega_0 L_s) \quad (7)$$

式中, \dot{U}_h'' 和 i_h'' 分别为电压暂态扰动时 PCC 电压和负载电流对应的 h 次谐波相量(有效值)。因为电压暂态扰动前后主电网背景谐波均为 0, 则在扰动前后负载的谐波电流均由光伏电站提供且不能突变, 所以 $i_h'' \approx i_h'$, 从而由式(2)和式(7)推导出 $\dot{U}_h'' \approx \dot{U}_h'$ 。

综上所述, 对于某一特定次数(\bar{h} 次以下)的谐波, 孤岛发生以后谐波电压会增大, 而电压暂态扰动发生以后谐波电压基本不会改变。以此为依据可以区分孤岛现象和电压暂态扰动现象, 进而执行孤岛保护或者低电压穿越动作。因此, 需要设定一个谐波电压阈值 $U_{h,set}$, 当谐波电压大于 $U_{h,set}$ 时, 判定系统处于孤岛状态, 反之则处于网侧电压暂态扰动状态。关于 $U_{h,set}$ 的整定方法将在 1.3 节详细论述。

1.2 背景谐波和频谱泄漏对故障检测的影响

上节结论建立在两个理想化假设上: (1) 主电网背景谐波为 0; (2) 故障前后频率不变, 即 ω_0 恒定。

然而实际上, 一方面任何电力系统都会存在一定的背景谐波, 这会对故障检测造成干扰。背景谐波的存在会对网侧电压暂态扰动时的谐波检测造成干扰, 由于相位差的不确定, 背景谐波有可能会和光伏电站产生的谐波相互抵消, 也有可能相互叠加。而孤岛时由于 PCC 点与主电网断开, 谐波检测器不再受背景谐波干扰, 实际检测到的谐波 $U_{h,det}''$ 应与理论值相吻合, 即

$$\begin{cases} U_{h,det}'' = U_h'' = K_h U_h' \\ U_{h,det}'' \in [U_h' - \delta U_h, U_h' + \delta U_h] \end{cases} \quad (8)$$

式中, δU_h 是 h 次的背景谐波且 $\delta U_h > 0$ 。

另一方面孤岛现象和电压暂态扰动均有可能导致系统频率发生变化。因为故障后的频率很难确定, 而其具体数值通常不会偏离工频太远, 所以目前多数学者^[25]仍以工频下的阻抗 Z_h 来分析电压谐波的幅值, 即认为式(3)和式(7)依然成立。那么引入了一个新的问题——频谱泄漏。

频谱泄漏是信号频谱中各谱线之间相互影响使测量结果偏离实际值, 同时在谱线两侧其他频率点上出现一些幅值较小的假谱。简单来说, 造成频谱泄漏的是采样频率, 而不是信号频率的整数倍, 造成周期采样信号的相位在始端和终端不连续^[30]。例如, 假设网侧电压暂态扰动以后系统频率由 50 Hz 变为 49.5 Hz, 且稳定, 此时系统中的 100 Hz 谐波幅值是接近于 0 的, 但实际上, 以现有谐波分析技术所得到的谐波谱线中依然会存在 100 Hz 谐波。这是因为“幅值较大的 49.5 Hz 间谐波”的存在干扰了对“幅值为 0 的 50 Hz 基波”的 2 次谐波的检测, 造成了频谱泄漏。

频谱泄漏在电力检测中是普遍存在的, 国内外学者通过给检测器加窗函数或者设置频率追踪功能等各种技术来抑制频谱泄漏现象, 但目前仍旧无法完全消除。本文的研究并不是试图抑制或消除频谱泄漏现象, 而是把频谱泄漏作为一个考虑因素应用于所提出的同步检测方法。

考虑频谱泄漏最严重情况, 即采样周期不等于信号周期的整数倍且不加窗函数。根据傅里叶级数

公式 $f(t) = a_0 / 2 + \sum_{h=1}^{+\infty} [a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)]$, 对一

个频率为 $f_1 + \Delta f$ 的正弦信号 ($V(t) = V \sin 2\pi(f_1 + \Delta f)t$) 在长度为 $1/f_1$ 的时间区间 $[k/f_1, (k+1)/f_1]$ 内作傅里叶展开, 可以得到该区间内的 h 次谐波幅值 $V_h(k)$ 的表达式为

$$\begin{cases} V_h(k) = \sqrt{a_h^2(k) + b_h^2(k)} \\ a_h(k) = 2f_1 \int_{\frac{1}{2f_1}}^{\frac{1}{2f_1}} V \sin 2\pi(f_1 + \Delta f) \left(t - \frac{k}{f_1}\right) \cos 2\pi h f_1 t dt \\ b_h(k) = 2f_1 \int_{\frac{1}{2f_1}}^{\frac{1}{2f_1}} V \sin 2\pi(f_1 + \Delta f) \left(t - \frac{k}{f_1}\right) \sin 2\pi h f_1 t dt \\ k > 0, h \in N^+, f_1 > 0, f_1 + \Delta f > 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中： h 为谐波次数； f_1 为工频($f_1 = 50$ Hz)； Δf 为故障后的频率偏移量； k/f_1 为所截取的时间区间的起点， k 是为了计算需要而引入的一个参数。若将 k 视为变量，则 $V_h(k)$ 可视为关于 k 的函数。考虑实际情况，本文设 $V(t)$ 为故障后光伏并网节点PCC处的电压，即 $V = \sqrt{2}U_{PCC}$ (U_{PCC} 为并网电压的有效值)。

接下来讨论频谱泄漏对故障检测的影响。对于孤岛现象，由式(4)可知，光伏并网系统原本就存在一定量的谐波，孤岛发生后这些谐波幅值会被放大 K_h 倍。而孤岛发生后通常会产生频率偏移，这就会造成频谱泄漏，所以谐波检测装置检测到的谐波实际上是由孤岛系统原有的谐波和因频谱泄漏而产生的谐波(有效值， $V_h(k)/\sqrt{2}$)叠加而成，换句话说，实际检测到的孤岛谐波 $U''_{h,det}$ 要比式(8)所给出的值更大。

对于网侧电压暂态扰动现象，通常电压跌落的同时也伴随着频率偏移，所以在扰动后也存在频谱泄漏现象，即扰动后检测到的谐波要比扰动前大。而且因为扰动前后系统原有的谐波幅值很小，所以扰动后检测到的谐波 $U'''_{h,det}$ 大致上等于由频谱泄漏而产生的谐波($V_h(k)/\sqrt{2}$)与背景谐波之和。

综上，式(8)所给出的实际检测到的谐波与理论分析得出的谐波之间的关系可以修正为

$$\begin{cases} U''_{h,det} \in [K_h U'_h, +\infty) \\ U'''_{h,det} \in \left[\frac{V_h(k)}{\sqrt{2}} - \delta U_h, \frac{V_h(k)}{\sqrt{2}} + \delta U_h \right] \end{cases} \quad (10)$$

式中： $U''_{h,det}$ 为孤岛时的 h 次谐波电压有效值； $U'''_{h,det}$ 为电压暂态扰动时的 h 次谐波电压有效值； $V_h(k)$ 为网侧电压暂态扰动时由于频谱泄漏而产生的 h 次谐波电压幅值； δU_h 为 h 次的背景谐波电压有效值。

1.3 谐波电压阈值的整定

设置作为区分孤岛和电压暂态扰动判据的谐波电压阈值 $U_{h,set}$ 时，应满足两个基本原则：1) $U''_{h,det}$ 、 $U_{h,set}$ 必须大于电压跌落时检测到的谐波电压值 $U'''_{h,det}$ ；2) $U_{h,set}$ 必须小于孤岛时检测到的谐波电压

值 $U''_{h,det}$ 。考虑频谱泄漏， $U''_{h,det}$ 和 $U'''_{h,det}$ 应满足式(10)，因此 $U_{h,set}$ 必须满足式(11)。

$$\frac{V_h(k)}{\sqrt{2}} + \delta U_h < U_{h,set} < K_h U'_h \quad (11)$$

由于 $V_h(k)$ 是关于 k 的函数，为了使式(11)左边的不等式恒成立，必须保证 $V_h(k)$ 的最大值 $V_{h,max}$ 满足 $V_{h,max}/\sqrt{2} + \delta U_h \leq U_{h,set}$ ；同时为了使式(11)右边的不等式恒成立， $U_{h,set}$ 必须足够小。因此，本文把作为区分两种故障的阈值整定为

$$U_{h,set} = \frac{V_{h,max}}{\sqrt{2}} + \delta U_h \quad (12)$$

为了进一步给出 $U_{h,set}$ 的具体表达式，首先要确定式(9)中的 h 和 Δf 的值。因次数越低，谐波幅值越大。此外，通常奇数次的背景谐波要大于偶数次的背景谐波，这意味着奇数次的谐波对检测造成干扰更严重，所以应选取偶数次谐波。因此，本文选取2次谐波即100 Hz谐波作为区分故障种类的判据，即 $h = 2$ 。

关于参数 Δf 的取值：1) 为了保证本文所提方法在频谱泄漏最严重时仍能生效，频率偏移量应足够大；2) 为了在孤岛保护的检测盲区仍能区分两种故障，故障后的频率应仍在正常范围内(49.5~50.2 Hz^[15-23])。因此，本文设故障后的频率在正常范围的临界，即 $\Delta f = -0.5$ Hz。

确定了 h 和 Δf 的值后，接下来分别求 $V_{2,max}$ 和 δU_2 的值，从而给出 $U_{2,set}$ 的整定公式。

1) 确定 $V_{2,max}$ 的值

把 $h = 2$ 和 $\Delta f = -0.5$ Hz代入式(9)，所得到的2次谐波幅值(标么值)的表达式是关于参数 k 的函数：

$$V_2^*(k) = \frac{V_2(k)}{V} = 100 \left[\left(\int_{\frac{1}{100}}^{\frac{1}{100}} \sin 99\pi \left(t - \frac{k}{50}\right) \cos 200\pi t dt \right)^2 + \left(\int_{\frac{1}{100}}^{\frac{1}{100}} \sin 99\pi \left(t - \frac{k}{50}\right) \sin 200\pi t dt \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

用Matlab绘制式(13)的函数图像，如图2所示。由图2可知，频谱泄漏时的谐波电压(幅值) $V_2^*(k)$ 是关于参数 k 的周期函数，且当 $k = 25$ 时， $V_2^*(k)$ 有最小值 $V_{2,min}^* = 0.0066$ ；当 $k = 50$ 时， $V_2^*(k)$ 有最大值 $V_{2,max}^* = 0.0132$ ，因此 $V_{2,max} = V_{2,max}^* V = 0.0132 V$ 。

又因为 $V = \sqrt{2}U_{PCC}$ ，所以还需要确定 U_{PCC} 的取值。由于 U_{PCC} 是故障运行时PCC处的电压，其值

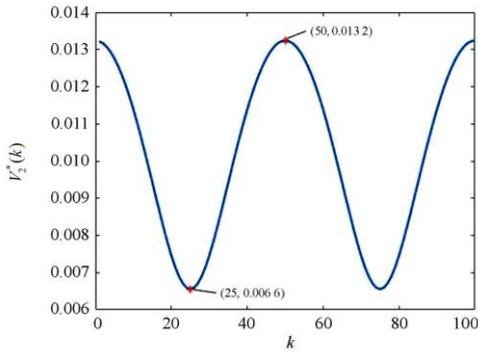


图2 2次谐波电压的函数图像

Fig. 2 Function image of 2nd harmonic voltage

具有不确定性。根据并网准则^[15-23], 低电压穿越时PCC处的电压为正常运行电压的0.2~0.9倍。与前文类似, 为了使式(8)左边的不等式恒成立, U_{PCC} 的取值应尽可能的大, 故可以令 $U_{PCC} = 0.9U_N / \sqrt{3}$ (U_N 是PCC处的电压等级, 通常指线电压, 而本文中的电压和电流均指相电压和相电流)。

综上可得:

$$V_{2,max} = 0.0119 \sqrt{\frac{2}{3}} U_N \quad (14)$$

式中, U_N 是PCC处的电压等级。

2) 确定 δU_2 的值

国标 GB/T 14549-1993^[31]给出了公用电网所允许的在PCC处注入的2次背景谐波电流允许值 δI_2 的计算公式。

$$\delta I_2 = \frac{S_{K1}}{S_{K2}} \delta I_{2P} \quad (15)$$

式中: S_{K2} 为PCC处的最小短路容量(由实际系统决定); S_{K1} 为基准短路容量(可以根据电压等级 U_N 查表得到); δI_{2P} 为短路容量为 S_{K1} 时的2次背景谐波电流允许值。对于图1所示的系统, S_{K2} 可由式(16)给出。

$$S_{K2} = \frac{U_N^2}{|jh\omega_0 L_S|} \quad (16)$$

为了保证 $U_{2,set}$ 的整定不受背景谐波干扰, 应考虑背景谐波最大的情况, 故本文将 δU_2 设为 δI_2 所对应的PCC处背景谐波电压, 即

$$\delta U_2 = \delta I_2 |Z_h // jh\omega_0 L_S| = \frac{S_{K1}}{S_{K2}} \delta I_{2P} |Z_h // jh\omega_0 L_S| \quad (17)$$

最后, 把式(14)、式(16)、式(17)和 $h=2$ 代入式(12), 得到2次谐波电压阈值的整定公式。

$$U_{2,set} = \left(\frac{0.0119 U_N}{\sqrt{3}} + \frac{|Z_2 // j2\omega_0 L_S| |j2\omega_0 L_S|}{U_N^2} S_{K1} \delta I_{2P} \right) \quad (18)$$

式中: $U_{2,set}$ 为2次谐波电压阈值; U_N 为PCC处电压等级; Z_2 为PCC处2次谐波的负载阻抗; $\omega_0 = 2\pi f_0$ 为工频对应的角频率; L_S 为电网侧等效电感; S_{K1} 为基准短路容量; δI_{2P} 为短路容量为 S_{K1} 时的2次背景谐波电流允许值。其中, S_{K1} 和 δI_{2P} 均可以根据电压等级 U_N 查阅GB/T 14549-1993^[31]得到, 且式(18)中所有电压和电流的物理量均为有效值。

式(18)定量地给出了区分孤岛现象与电压暂态扰动的阈值, 它可以作为仿真模型中或者工业实际中光伏电站故障处理的有效判据。

2 同步检测实现方案

根据上节的分析, 本文提出了一种孤岛保护与低电压穿越的同步检测方法, 该方法根据系统运行状态异常期间PCC谐波电压 U_h 变化特性的不同来区分孤岛现象与电压暂态扰动现象, 其实现方案如图3所示。其中, $U_{h,set}$ 是 h 次谐波电压阈值, 本文取 $h=2$, 它可以通过式(18)得到。

步骤1: 采集PCC电压、电流及频率等信息, 对电压做快速傅里叶变换(FFT), 提取 h 次谐波电压 U_h (有效值)。

步骤2: 将实时检测的频率 f_{PCC} 与正常频率 f_0 相比较。若 f_{PCC} 在正常范围内(49.5~50.2 Hz), 则执行步骤3; 若 f_{PCC} 超出并网准则^[15-23]所规定的频率允许范围(48Hz ~ 50.5 Hz, 考虑频率适应性, 该范围要大于正常范围)且持续0.1 s以上(为避免暂态过程的影响^[14]), 则判定系统处于孤岛状态, 并执行孤岛保护动作。

步骤3: 将实时检测的电压有效值 U_{PCC} 与正常电压 U_0 相比较。若 U_{PCC} 明显低于正常值, 则判定系统处于非正常运行状态(根据上文分析, 此时系统有可能处于孤岛状态或者电压暂态扰动状态), 执行步骤4; 若检测到 U_{PCC} 等于正常值, 则继续正常运行。

步骤4: 根据 U_h 的变化协调孤岛保护和低电压穿越两种功能。若检测到 $U_h > U_{h,set}$, 但持续时间小于 T_{min} , 则判定网侧电压发生暂态扰动, 执行步骤5; 若检测到 $U_h > U_{h,set}$, 且持续时间超过 T_{min} , 则判定系统出现孤岛现象并立即执行孤岛保护动作。注意, 此处考虑持续 T_{min} 时间是因为故障瞬间电压波形会有较大的畸变, 谐波幅值会不可避免地达到一个很高的峰值, 本文取 $T_{min} = 0.1$ s。

步骤5: 执行低电压穿越。

1) 根据电压状态信息判断是否满足不脱网条件^[15-23], 若满足则执行2), 否则光伏电站立即解列;

2) 进入低电压穿越运行状态即光伏系统保持并网运行, 根据相关标准^[15-23]为暂态运行期间PCC

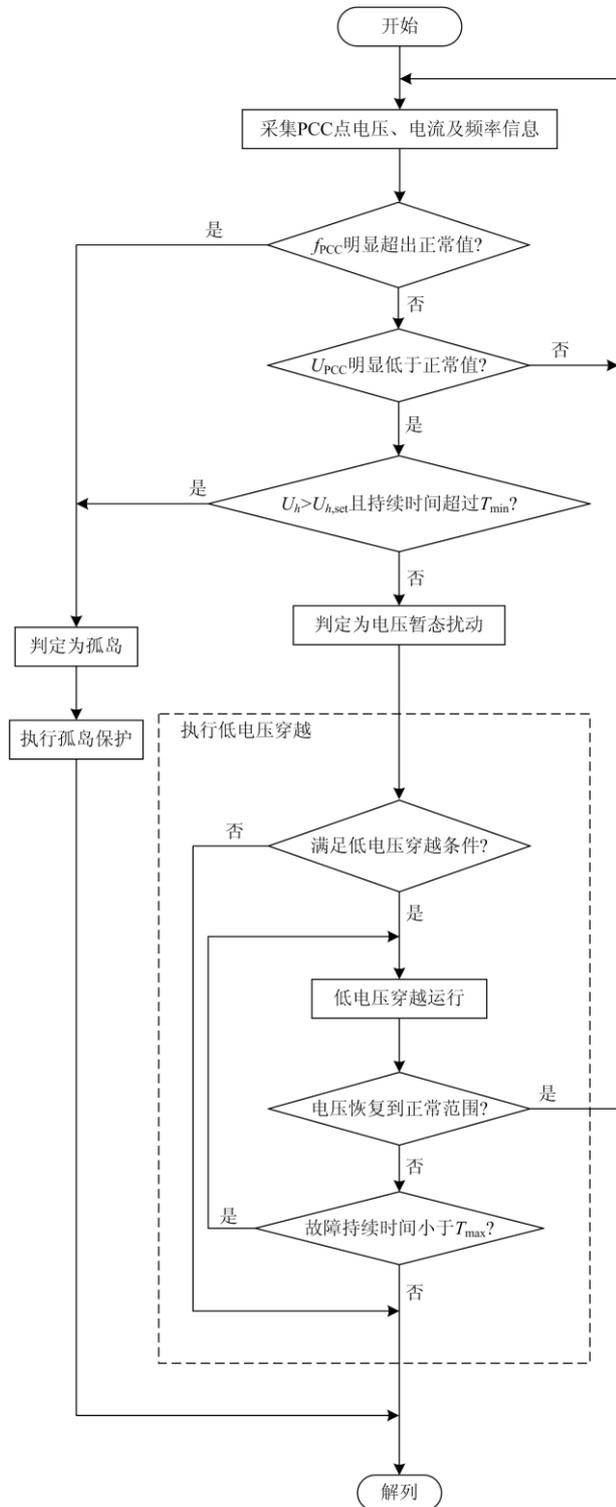


图3 同步检测方法算法流程图

Fig. 3 Flow chart of simultaneous detection algorithm

电压提供暂态无功支撑;

3) 经过最大穿越时限 T_{max} 后, 判断电压是否达到正常值, 若达到, 则恢复正常运行, 否则低电压

穿越失败, 光伏电站立即解列。

从上述流程可以看出, 为了综合考虑电压、频率、谐波等各个电气量的作用, 本节的方案还考虑了孤岛的频率保护。在判断电压是否异常之前首先判断频率是否异常, 若频率异常, 则可直接判定系统处于孤岛状态。这么设置的原因在于: 1) 频率检测法单独以频率作为判据, 存在较大的检测盲区, 所以需要结合电压检测法来判定故障; 2) 电压检测法有可能混淆孤岛现象与电压暂态扰动现象, 从而造成孤岛误判和低电压穿越失败, 所以需要进一步结合谐波检测法来分析系统运行状态。

3 算例分析

3.1 仿真实验分析

本文基于 Matlab/Simulink 仿真平台搭建了光伏并网系统模型, 先后进行了孤岛仿真和电压暂态扰动仿真, 仿真时长均为 1.8 s, 在两次仿真中故障出现时刻均为 1 s。仿真参数设置如表 1 所示, 其中 S_{K1} 和 δI_{2P} 是查阅国标 GB/T 14549-1993^[31]得到的。

根据表 1 的数据: 由式(6)可以算出, 2、3、4、5 次谐波均可作为孤岛判据; 由式(18)可知, 2 次谐波还可以作为同步检测的判据, 且可以求得 2 次谐波电压阈值 $U_{2,set} = 3.527 \text{ V}$ 。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Setting of simulation parameters

参数	值
本地负载电阻 R/Ω	1.00
本地负载电感 L/H	1.00×10^{-3}
本地负载电容 C/F	1.034×10^{-2}
电网侧等效电感 L_s/H	2.00×10^{-5}
PCC 处电压等级 U_N/V	380
主电网频率 f/Hz	50
主电网谐波畸变率/%	1.82
U_N 对应的基准短路容量 S_{K1}/VA	1×10^7
S_{K1} 对应的背景谐波电流允许值 $\delta I_{2P}/A$	78

仿真主要研究故障前后谐波的变化, 为了尽可能地放大频谱泄漏对故障后谐波的影响, 同时避免频率保护系统对本文所提方法的干扰, 把频率控制在正常范围(49.5~50.2 Hz)的边界。此外, 为了控制变量以进行对照实验, 本文通过调节负荷参数以及设置主电网参数, 将电压暂态扰动期间的 PCC 处电压和频率设置为与孤岛期间相同, 即: 两种故障出现后, PCC 处电压由 220 V 降至 147 V, 频率均由 50 Hz 偏移至 49.5 Hz。对应的仿真结果如图 4、图 5 所示。

图 4 是孤岛发生前后 PCC 处谐波电压幅值的仿

真结果, 图 5 是电压暂态扰动前后 PCC 处谐波电压幅值的仿真结果。2 次谐波电压阈值 $U_{2,set}$ 的大小已在图 4 和图 5 中标明, 显然孤岛后的 2 次谐波要大于这个阈值, 而电压暂态扰动后的 2 次谐波要小于这个阈值, 这说明根据式(18)计算出的 $U_{2,set}$ 可以准确区分两种故障。

对图 4 和图 5 中的仿真结果进行计算、记录及整理, 得到表 2。其中 K_h 根据式(7)和表 1 计算得出, $U'_{h,det}$ 、 $U''_{h,det}$ 、 $U'''_{h,det}$ 的含义与式(10)一致, 即 $U'_{h,det}$ 是正常运行时 PCC 处的谐波电压, $U''_{h,det}$ 是孤岛运行时 PCC 处的谐波电压, $U'''_{h,det}$ 是网侧电压暂态扰动时 PCC 处的谐波电压。由于背景谐波很小, 因而本实验中 $U'_{h,det} \approx U'_h$, $KU'_{h,det} \approx KU'_h$ 。

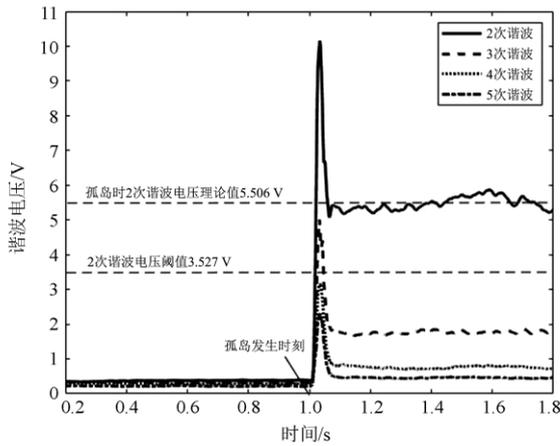


图 4 孤岛发生前后 PCC 谐波电压幅值仿真结果

Fig. 4 Simulation results of peak harmonic voltages in PCC before and after occurrence of islanding

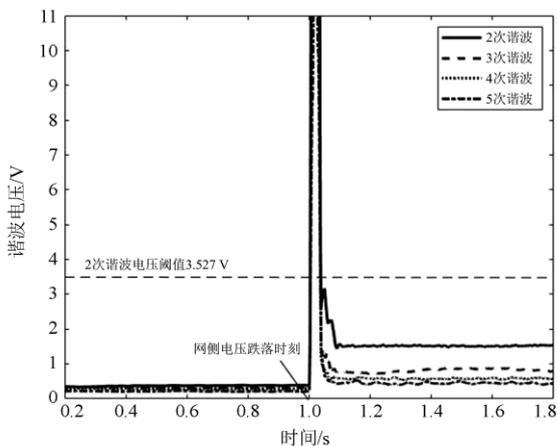


图 5 电压暂态扰动前后 PCC 谐波电压幅值仿真结果

Fig. 5 Simulation results of peak harmonic voltages in PCC before and after voltage transient perturbation

分析表 2 中的数据可以得到以下几点结论。

表 2 仿真结果数据分析

Table 2 Data analysis of simulation results				
h	2	3	4	5
$U'_{h,det} / \text{V}$	0.369	0.306	0.286	0.291
$U''_{h,det} / \text{V}$	5.649	1.809	0.800	0.460
$U'''_{h,det} / \text{V}$	1.518	0.807	0.580	0.457
K_h	14.92	5.077	2.256	1.040
$K_h U'_{h,det} / \text{V}$	5.506	1.590	0.645	0.223

注: 表内电压数据均为有效值。

1) 对比 $U''_{h,det}$ 和 $U'''_{h,det}$ 两组数据可知, 对于同一数次的谐波, 孤岛运行时的谐波电压幅值要大于电压暂态扰动时的谐波电压幅值, 并且谐波次数越低, 这种差距越明显。这一点与式(6)理论分析以及上文仿真参数计算结果相吻合, 即用谐波电压来区分孤岛状态和电压暂态扰动状态只在一定范围内有效, 当本实验中谐波次数超过 5 次时, 谐波电压便不再适合作为区分两种故障的判据。

2) 对比 $U''_{h,det}$ 和 $K_h U'_{h,det}$ 两组数据可知, 通过式(7)计算出的孤岛状态下谐波电压的理论值要比实际值更小, 这是因为实际值受到了频谱泄漏的影响, 即实际值由孤岛系统原有的谐波和因频谱泄漏而产生的谐波叠加而成。

3) 对于 2 次谐波, $U''_{2,det} = 5.649 \text{ V}$, $U'''_{2,det} = 1.518 \text{ V}$ 。显然 $U_{2,set} = 3.527 \text{ V}$ 满足 1.3 节所提的两个基本原则, 即 $U'''_{2,det} < U_{2,set} < U''_{2,det}$, 因此把 $U_{2,set}$ 应用于 1.4 节中的同步检测实现方案(如图 4 和图 5 所示), 可以有效协调光伏并网系统的孤岛保护和低电压穿越功能。

3.2 现场实验分析

2019 年 10 月 18 日, 国网吉林省电力有限公司和中国电力科学研究院有限公司合作开展了“协鑫边昭光伏电站带边昭变孤岛试验”, 实验线路如图 6 所示。

现场实验人员在 07:43 和 09:35 时进行了两次孤岛运行, 本文仅以 07:43 时这次孤岛运行为例验证所提方法。在孤岛运行前, 现场实验人员通过人为调节光伏电站的有功出力和无功出力, 使之与本地负荷相匹配(即使光伏电站工作在传统的孤岛检测盲区), 从而使孤岛发生以后的频率和电压尽可能稳定在正常范围, 实现持续性的孤岛运行。

实验过程为: 07:43 时在准备工作就绪后, 断开开通变开太线开关, 光伏电站带边昭变孤岛运行。5 s 左右, 孤岛系统频率跌至 45 Hz, 光伏逆变器低频保护告警, 延时 0.2 s 保护动作; 之后逆变器电压

跌至 50% 额定电压以下，逆变器 II 段低压解列保护动作；延时 0.1 s 后，频率电压紧急控制装置动作，光伏并网开关跳开，孤岛运行终止。

本次实验主电网为强电网，网侧等效电感 L_S 可视为 0，PCC 处(即开太线)电压等级 $U_N = 66 \text{ kV}$ 。由式 (18) 可以计算出 2 次谐波电压阈值 $U_{2,\text{set}} = 453.46 \text{ V}$ 。图 7 是通过分析现场实验数据得

到的 PCC 处 2 次谐波电压， $U_{2,\text{set}}$ 已经在图中标明。

由图 7 可知，孤岛发生以后 PCC 处谐波电压明显超过 $U_{2,\text{set}}$ ，且持续 0.1 s 以上，因此 $U_{2,\text{set}}$ 可以作为判定孤岛的依据。当然，现场实验并未涉及电压暂态扰动，因此本次实验只能验证本文所提方法满足 1.3 节所提的基本原则 2)，对于基本原则 1) 需要进一步调研实际运行的案例。

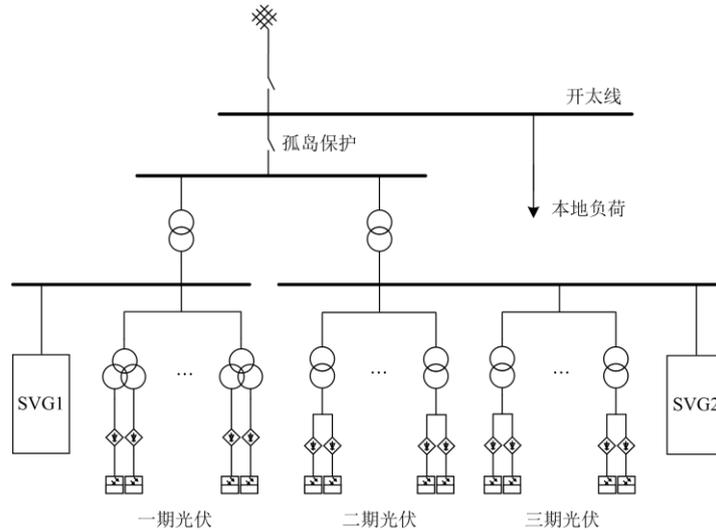


图 6 孤岛实验线路图

Fig. 6 Circuit diagram of islanding experiment

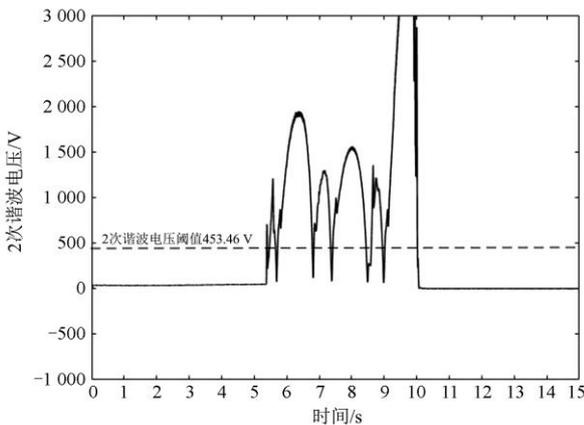


图 7 孤岛发生前后 PCC 处 2 次谐波电压幅值

Fig. 7 Peak 2nd harmonic voltages in PCC before and after occurrence of islanding

4 结论

针对光伏并网系统孤岛保护与低电压穿越之间的运行冲突问题，本文计算分析了孤岛和网侧电压跌落前后两种故障谐波电压的变化特性，综合考虑了主电网背景谐波和频谱泄漏对谐波检测的影响，提出了一种基于谐波特性的同步检测方法，并给出

了作为检测依据的谐波电压阈值。该方法可以有效辨识 PCC 电压跌落的原因，使孤岛保护措施和低电压穿越操作互不干扰，确保光伏并网系统的安全稳定运行。

下一步研究将考虑控制器检测到 PCC 处电压异常时，低电压穿越所要求的动态无功支撑与主动式孤岛检测法之间的配合问题。

参考文献

[1] 贾科, 魏宏升, 李晨希, 等. 基于 SVG 功率因数调节的光伏电站集中孤岛检测法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 92-97.
 JIA Ke, WEI Hongsheng, LI Chenxi, et al. Centralized islanding detection method for photovoltaic power station based on power factor regulation with SVG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 92-97.
 [2] 程启明, 王映斐, 程尹曼, 等. 分布式发电并网系统中孤岛检测方法的综述研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 147-154.
 CHENG Qiming, WANG Yingfei, CHENG Yinman, et al. Overview study on islanding detecting methods for distributed generation grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 147-154.

- [3] 杨蕾, 吴琛, 黄伟, 等. 含高比例风光新能源电网的多目标无功优化算法[J]. 电力建设, 2020, 41(7): 100-109. YANG Lei, WU Chen, HUANG Wei, et al. Pareto-based multi-objective reactive power optimization for power grid with high-penetration wind and solar renewable energies[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(7): 100-109.
- [4] 王同文, 徐靖东, 邵庆祝, 等. 光伏发电系统非计划孤岛问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 173-180. WANG Tongwen, XU Jingdong, SHAO Qingzhu, et al. Research on non-scheduled islanding supplied by photovoltaic power generations[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 173-180.
- [5] 孙旻, 张大, 曾伟, 等. 计及光伏消纳率的分布式光伏电源双层多场景规划[J]. 现代电力, 2019, 36(2): 17-24. SUN Min, ZHANG Da, ZENG Wei, et al. Bi-layer multi-scenario planning of distributed photovoltaic generations considering photovoltaic accommodation rate[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(2): 17-24.
- [6] 刘轶, 王景钢. 大型光伏电站并网暂态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 182-187. LIU Yi, WANG Jinggang. Analysis of transient characteristics when large-scale photovoltaics are connected to a power system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 182-187.
- [7] 贾科, 陈金锋, 钮厚敏, 等. 光伏并网系统的谐振抑制策略及无源阻尼选取方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(15): 109-114. JIA Ke, CHEN Jinfeng, NIU Houmin, et al. Resonance suppression strategy and passive damping resistance selection method for photovoltaic grid-connected system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15): 109-114.
- [8] 张明锐, 王俊凯, 王佳莹, 等. 微网混合式孤岛检测及运行模式切换研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 1-8. ZHANG Mingrui, WANG Junkai, WANG Jiaying, et al. Study on hybrid islanding detection and operation mode transition of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 1-8.
- [9] 张帆, 杨翮, 商佳宜, 等. 考虑负荷损失最小的配网孤岛划分策略研究[J]. 高压电器, 2021, 57(4): 181-188. ZHANG Fan, YANG Xuan, SHANG Jiayi, et al. Study on island partition strategy of distribution network considering minimum load loss[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4): 181-188.
- [10] 杨珮鑫, 张沛超. 分布式电源并网保护研究综述[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1888-1895. YANG Peixin, ZHANG Peichao. A survey on interconnection protection of distributed resource[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1888-1895.
- [11] 樊淑娴, 徐丙垠, 马士聪. 载波闭锁式孤岛保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 119-124. FAN Shuxian, XU Bingyin, MA Shicong. Carrier blocked islanding protection scheme[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 119-124.
- [12] 解吉蕾, 杨秀, 王巨波, 等. 基于MPPT运行模式的光伏发电系统低电压穿越无功控制策略[J]. 太阳能学报, 2019, 40(12): 3426-3434. XIE Jiqiang, YANG Xiu, WANG Jubo, et al. A reactive power control strategy in low-voltage ride-through of photovoltaic generation system based on MPPT mode[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(12): 3426-3434.
- [13] 王书征, 李先允, 许峰. 不对称电网故障下级联型光伏并网逆变器的低电压穿越控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 84-91. WANG Shuzheng, LI Xianyun, XU Feng. Low voltage ride-through controlling of cascaded inverter for grid-connected photovoltaic systems under asymmetric grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 84-91.
- [14] 马聪, 高峰, 李瑞生, 等. 新能源并网发电系统低电压穿越与孤岛同步检测的无功功率扰动算法[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1406-1414. MA Cong, GAO Feng, LI Ruisheng, et al. Reactive power perturbation method for simultaneous low voltage ride-through and islanding detection of grid-tied renewable energy generation systems[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1406-1414.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012. Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [16] IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems: IEEE Std 1547.1—2020[S]. 2020.
- [17] IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) systems: IEEE Std 929—2000[S]. 2000.
- [18] 中国国家标准化管理委员会. 分布式电源并网要求: GB/T 33593—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. Standardization Administration of the People's Republic

- of China. Technical requirements for grid connection of distributed resource: GB/T 33593—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [19] 中国国家标准委员会. 光伏发电系统接入配电网技术规定: GB/T 29319—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements for connecting photovoltaic power system to distribution network: GB/T 29319—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [20] 国家能源局. 分布式电源接入配电网技术规定: NB/T 32015—2013[S]. 北京: 国家能源局, 2013.
National Energy Administration. Technical rule for distributed resources connected to distribution network: NB/T 32015—2013[S]. Beijing: National Energy Administration, 2013.
- [21] 国家能源局. 光伏并网逆变器技术规范: NB/T 32004—2018[S]. 北京: 国家能源局, 2018.
National Energy Administration. Technical specification of PV grid-connected inverter: NB/T 32004—2018[S]. Beijing: National Energy Administration, 2018.
- [22] 国家电网公司. 光伏电站接入电网技术规定: Q/GDW 1617—2015[S]. 北京: 国家电网公司, 2016.
State Grid Corporation of China. Technical rule for connecting photovoltaic power station to power grid: Q/GDW 1617—2015[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2016.
- [23] 国家电网公司. 分布式电源接入电网技术规定: Q/GDW 1480—2015[S]. 北京: 国家电网公司, 2015.
State Grid Corporation of China. Technical rule for distributed resources connected to power grid: Q/GDW 1480—2015[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2015.
- [24] 叶林, 苗丽芳, 苏剑, 等. 基于阻抗特性的 IIDG 孤岛保护与故障穿越协调运行方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 67-73.
YE Lin, MIAO Lifang, SU Jian, et al. Impedance characteristic based coordinated operation method for islanding protection and fault ride-through of inverter interfaced distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 67-73.
- [25] TUYEN N D, FUJITA G. Negative-sequence current injection of dispersed generation for islanding detection and unbalanced fault ride-through[C] // 46th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), September 5-8, 2011, Soest, Germany: 1-6.
- [26] DAS P P, CHATTOPADHYAY S. A voltage-independent islanding detection method and low-voltage ride through of a two-stage PV inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(3): 2773-2783.
- [27] DIETMANNBERGER M, SCHULZ D. Compatibility of fault-ride-through capability and anti-islanding-detection in inverters connected to low voltage distribution grids[C] // 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 23-26, 2016, Florence, Italy: 7010-7015.
- [28] REDDY V R, ES S. A feedback based hybrid islanding detection method and voltage ride-through of one cycle controlled PV inverter[C] // National Power Electronics Conference (NPEC), December 13-15, 2019, Tiruchirappalli, India: 10-16.
- [29] 陈永华, 唐冠军, 王森, 等. 基于谐波电压与基波频率的被动式孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 200-206.
CHEN Yonghua, TANG GuanJun, WANG Sen, et al. Passive islanding detection method based on harmonic voltage and fundamental frequency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 200-206.
- [30] 马仁政, 陈明凯. 减少频谱泄漏的一种自适应采样算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(7): 55-58.
MA Renzheng, CHEN Mingkai. An adaptive sampling algorithm for reducing spectrum leakage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(7): 55-58.
- [31] 中国国家标准委员会. 电能质量-公用电网谐波: GB/T 14549—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Quality of electric energy supply—harmonics in public supply network: GB/T 14549—1993[S]. Beijing: Standards Press of China, 1993.

收稿日期: 2021-04-10; 修回日期: 2021-07-17

作者简介:

赵禹灿(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网逆变控制; E-mail: 21960100@zju.edu.cn

于森(1984—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为配电网与微电网运行控制。E-mail: zjuyumiao@zju.edu.cn

(编辑 姜新丽)