

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240337

# 基于VSG角频率误差负反馈的电压相位变化率孤岛检测方法

罗瑞<sup>1</sup>, 高厚磊<sup>1</sup>, 齐晓丽<sup>1</sup>, 陈鹤冲<sup>2</sup>, 杨帆<sup>2</sup>, 杨志淳<sup>2</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077)

**摘要:** 为了保障电网运行安全, 分布式电源接入电网需要具备孤岛检测功能。传统过/欠频、过/欠压孤岛检测方法, 应用于含虚拟同步发电控制逆变器和跟网逆变器的孤岛时, 具有检测盲区较大的问题。为解决该问题, 首先, 推导了构网逆变器和跟网逆变器共同形成孤岛时电压幅值和频率的解析式, 在此基础上验证了过/欠频、过/欠压方法无法准确检测出孤岛。然后, 提出在 $dq$ 坐标系中计算电压相位变化率的孤岛检测方法。并在VSG有功环加入角频率误差负反馈, 以提高检测的准确性、灵敏性。最后, 利用PSCAD搭建了构网逆变器和跟网逆变器构成孤岛的模型, 仿真验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 孤岛检测; VSG; 角频率误差负反馈; 并联逆变器; 跟网逆变器

## An islanding detection method based on voltage phase rate of change with VSG angular frequency error negative feedback

LUO Rui<sup>1</sup>, GAO Houlei<sup>1</sup>, QI Xiaoli<sup>1</sup>, CHEN Hechong<sup>2</sup>, YANG Fan<sup>2</sup>, YANG Zhichun<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

**Abstract:** To ensure safe operation of the power grid, distributed power sources connected to the grid need to have islanding detection capabilities. Traditional over/under frequency (OUF) and over/under voltage (OUV) methods for islanding detection have a significant non-detection zone (NDZ) when applied to islands formed by virtual synchronous generator (VSG)-controlled inverters and grid-following inverters. To address this issue, the expressions for voltage amplitude and frequency are first derived for the scenario where grid-forming and grid-following inverters jointly form an island. Based on this, it is verified that the OUF and OUV methods cannot accurately detect the islanding condition. Then, a method for islanding detection is proposed by calculating the rate of change of voltage phase in the  $dq$  frame. Additionally, angular frequency error negative feedback is introduced into the active power loop of the VSG to improve detection accuracy and sensitivity. Finally, an islanding model of grid-forming and grid-following inverters using PSCAD is built, and the simulation validates the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5400-202322206A-1-1-ZN).

**Key words:** islanding detection; virtual synchronous generators (VSG); angular frequency error negative feedback; parallel inverter; grid-following inverter

## 0 引言

随着可再生能源资源的利用不断增加, 逆变器型电源作为可再生能源和电网之间的重要连接逐渐增多。它们实现了高效的能量转换, 并灵活可控。

然而目前工程中广泛采用的并网逆变器为跟网型控制结构, 其表现为电流源, 不具备同步发电机的电压源特性。并且随着新能源的大规模接入, 同步发电机在系统中的占比逐渐降低, 为系统的安全稳定运行带来影响<sup>[1-3]</sup>。为了应对这一问题, 虚拟同步发电机(virtual synchronous generators, VSG)被提出作为解决方案, 旨在模拟同步发电机的特性<sup>[4-5]</sup>。

孤岛现象是指, 分布式电源与电网断开后, 仅

**基金项目:** 国家电网公司总部科技项目资助 (5400-202322206A-1-1-ZN)

与本地负荷形成供需平衡的功率关系的供电系统现象<sup>[6]</sup>。孤岛检测是分布式电源并网的关键问题之一。相比于基于 PQ 控制的逆变电源,虽然 VSG 控制可以让逆变电源具有构网能力,在孤岛情况下不用切换控制策略<sup>[7]</sup>。但是非计划孤岛仍会给设备和人身带来一些危害<sup>[8-9]</sup>。例如,当 VSG 控制逆变器非计划孤岛后重新接入电网时,由于 PCC 点电压幅值、相位与电网不同步,可能会产生较大的电流冲击,进而对电网造成损害。此外,非计划孤岛还会造成将带电路误认为是不带电的安全线路,对检修人员带来电击的危险。因此 VSG 控制逆变器仍需要配置孤岛检测装置。

现存的孤岛检测方法可以分为两类<sup>[10-11]</sup>: 依赖通信的孤岛检测方法和本地信息孤岛检测方法。依赖通信的检测方法需要配置通信装置,成本较高,且其对通信的可靠性要求较高。本地信息检测法又可分为主动式孤岛检测法和被动式孤岛检测法。主动式孤岛检测法包括主动移频、移相法,该方法虽然具有检测盲区小的优点,但是会对电能质量造成一定的负面影响。由于 VSG 控制策略具有有功-频率、无功-电压的下垂关系,其可以自主地调节输出频率和电压幅值,因此传统移频、移相法在具有下垂关系的控制算法中的适应性较差,无法准确检测出孤岛<sup>[11-14]</sup>。传统基于过/欠频、过/欠压的被动式孤岛检测方法的检测盲区也会随着下垂控制的下垂系数的减小而增大,会造成该被动式孤岛检测方法失效<sup>[13-15]</sup>。同时文献[15-16]证明了 Sandia 频率偏移法、滑模频率偏移等方法并不能准确应用于下垂控制逆变器的孤岛检测。由于 VSG 与下垂控制策略相比仅是增加了惯性,在频率和电压方面表现出的特性基本一致<sup>[17]</sup>,所以上述对于下垂控制孤岛检测方法的检测盲区分析仍可以适用于 VSG 控制策略。文献[12]利用电网实际频率当作有功环的频率指令,利用孤岛后的频率偏移现象进行孤岛检测。文献[15]将频率反馈加入无功环中,减小了孤岛检测的盲区。文献[18]提出一种被动式的谐波阻抗检测方法,利用  $dq$  分量计算谐波阻抗,可以较为快速准确地检测出孤岛,但该方法只适用于 150 Hz 和 250 Hz 特定频率。上述方法都是针对下垂控制策略进行的孤岛检测方法改进,虽然 VSG 控制和下垂控制有相似之处,但是 VSG 有功环具有的惯性环节,依然会对主动式、被动式孤岛检测的准确性造成影响,且上述改进方法并不能直接应用于 VSG 控制策略。

因此,本文首先推导了构网逆变器和跟网逆变器共同形成孤岛时的电压幅值和频率的解析式,在此基础上验证了过/欠频、过/欠压方法无法准确检

测出孤岛。然后提出基于 VSG 角频率误差负反馈的电压相位变化率孤岛检测方法,该方法利用  $dq$  坐标系计算电压的相位变化率进行孤岛检测;并在 VSG 有功环加入角频率误差负反馈,提高检测的准确性、灵敏性。最后利用 PSCAD 搭建了 VSG 控制和跟网控制并联逆变器的孤岛模型,仿真验证了所提方法的有效性。

## 1 VSG 控制原理

图 1 为系统拓扑结构,系统侧为 220 kV 电网,支路 1 和支路 2 为 10 kV 配电网,支路 2 接入两个分布式电源(distributed generation, DG),有功、无功功率参考值均为 2 MW 和 0 Mvar。DG1(额定容量 2 MVA,单位功率因数运行)采用 PQ 跟网控制策略,DG2 采用 VSG 构网控制策略。当开关 K 断开时,DG1 和 DG2 与本地负荷形成孤岛。

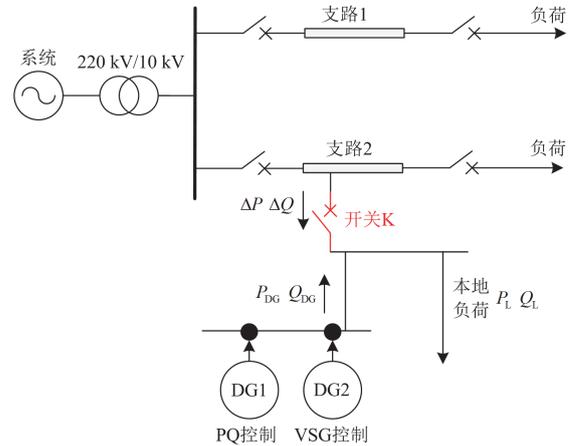


图 1 系统拓扑结构

Fig. 1 System topology

VSG 控制逆变器的控制结构如图 2 所示。其中: 开关管  $S_1 \sim S_6$  构成三相逆变桥; 滤波电感  $L_f$ 、 $L_g$  和滤波电容  $C_f$  构成 LCL 滤波器;  $i_a$ 、 $i_b$  和  $i_c$  为输出电流;  $\alpha$  为 VSG 有功环计算的相位。从逆变器模拟同步发电机的角度来看,可以认为桥臂中点电压  $e_a$ 、 $e_b$  和  $e_c$  模拟了同步发电机的内电势,滤波电感  $L_f$  模拟同步电抗,滤波电容电压  $u_a$ 、 $u_b$  和  $u_c$  模拟同步发电机的端电压。利用瞬时功率理论可以计算出 VSG 输出有功功率  $P_e$  和无功功率  $Q_e$ 。

$$\begin{cases} P_e = u_d i_d + u_q i_q \\ Q_e = u_q i_d - u_d i_q \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_d$ 、 $u_q$  为电容电压在  $dq$  同步旋转坐标系下的形式;  $i_d$ 、 $i_q$  为输出电流在  $dq$  同步旋转坐标系下的形式。

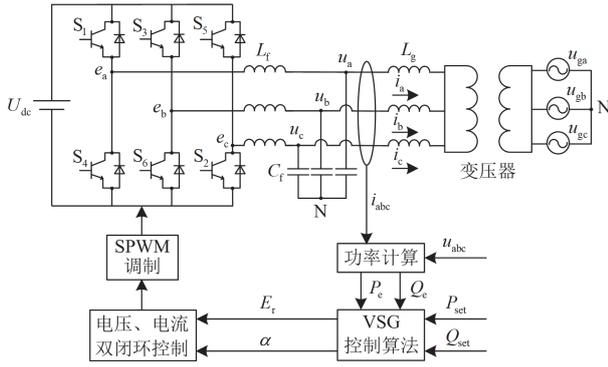


图 2 VSG 控制策略下的逆变器拓扑图

Fig. 2 Inverter topology under VSG control strategy

图 3 为 VSG 控制算法框图, 由图 3 可知 VSG 有功环模拟了同步发电机惯性  $J$  和一次调频特性, VSG 无功环模拟同步发电机的一次调压特性<sup>[19-21]</sup>。有功环和无功环的数学方程表达式为

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{\omega_n} (P_{set} - P_e) + D_p (\omega_n - \omega) \\ K \frac{dE_r}{dt} = Q_{set} - Q_c + D_Q (U_N - U) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\omega$ 、 $\omega_n$  分别为 VSG 计算角频率和角频率参考值;  $P_{set}$ 、 $D_p$  分别为有功功率(参考值 2 MW, 基准值为 2 MVA)和阻尼系数;  $K$ 、 $E_r$  分别为无功环积分系数和电压参考值;  $Q_{set}$ 、 $D_Q$  分别为无功功率参考值(无功参考值为 0)和无功-电压下垂系数;  $U_N$ 、 $U$  分别为电压参考值和实际值。

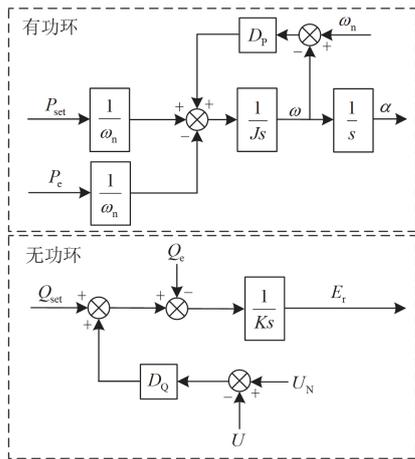


图 3 VSG 控制算法框图

Fig. 3 VSG control algorithm diagram

VSG 有功环输出相位  $\alpha$  用作电压电流双闭环的解耦控制, 无功环输出电压  $E_r$  作为电压环的电压参考值。并利用电压电流双闭环对电容电压和输出电流进行控制。

## 2 孤岛时频率、电压幅值求解

由于 VSG 具有下垂特性, 因此在孤岛时会根据负荷的大小产生随负荷变化的频率和电压参考值。下面对孤岛时 VSG 所建立的孤岛系统的频率和电压进行求解。图 1 的功率关系可用式(3)表达。

$$\begin{cases} P_L = \underbrace{P_{DG1} + P_c}_{P_{BG}} + \Delta P \\ Q_L = \underbrace{Q_{DG1} + Q_c}_{Q_{BG}} + \Delta Q \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_L$ 、 $Q_L$  分别为负荷吸收的有功功率和无功功率;  $P_{DG1}$ 、 $Q_{DG1}$  分别为 DG1 输出的有功、无功功率;  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$  分别为电网提供给负荷的有功、无功功率。

当逆变器输出的功率与负荷吸收的功率平衡时, 电网不给负荷提供功率, 此时  $\Delta P$  和  $\Delta Q$  均为 0。若此时发生孤岛, 由于功率匹配度较高, 频率、电压变化很小, 因此无法判断出孤岛的发生。而当功率匹配度低的时候, 在发生孤岛时, 频率、电压变化较大, 容易检测出孤岛。对式(2)进行标么化可得

$$\begin{cases} J^* \frac{d^2 \alpha^*}{dt^2} = (1 - P_c^*) + D_p^* (1 - \omega^*) \\ K^* \frac{dE_r^*}{dt} = -Q_c^* + D_Q^* (1 - U^*) \end{cases} \quad (4)$$

式中, 上标 “\*” 表示标么值。  $\alpha$  表达式如式(5)所示。

$$\alpha = \int \omega dt = \int 2\pi f dt \quad (5)$$

结合式(4)和式(5)以及图 3 有功环可得 VSG 输出频率和电压幅值计算如式(6)所示。

$$\begin{cases} J^* \frac{df^*}{dt} = (1 - P_c^*) + D_p^* (1 - f^*) \\ K^* \frac{dE_r^*}{dt} = -Q_c^* + D_Q^* (1 - U^*) \end{cases} \quad (6)$$

将式(3)标么化后代入式(6), 并且由于惯性的限制, 在  $t_0$  时刻发生孤岛时,  $f^*(t_0) = 1$ 、 $E_r^*(t_0) = 1$ , 将初值代入式(6)并求解微分方程, 可得频率和电压幅值的时域解为

$$\begin{cases} f^* = 1 + \frac{P_L^* E_r^2 - P_{DG1}^* - P_c^*}{D_p^*} (e^{-\frac{D_p^*}{J^*} t} - 1) \\ U^* = 1 + \frac{Q_L^*}{D_Q^*} (e^{-\frac{D_Q^*}{K^*} t} - 1) \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可见频率和电压幅值的时域解为额定频率 50 Hz 和额定电压 1 p.u. 加一个衰减分量。下面对频率和电压幅值的时域解析式进行验证, 在 PSCAD 搭建如图 1 所示的孤岛仿真模型, 其中 DG1

在孤岛前后为额定功率运行, DG2 孤岛前为额定功率运行, 孤岛后输出功率受负荷影响。针对本地负荷的有功功率和无功功率分别为 5 MW、1 Mvar 和 4 MW、0.5 Mvar 的情况进行仿真对比。图 4 为计算值与仿真值对比结果, 其中图 4 中电压、频率计算值与仿真值误差较小, 总体上频率、电压幅值的计算值与仿真值的误差在 2% 以内, 可以忽略。

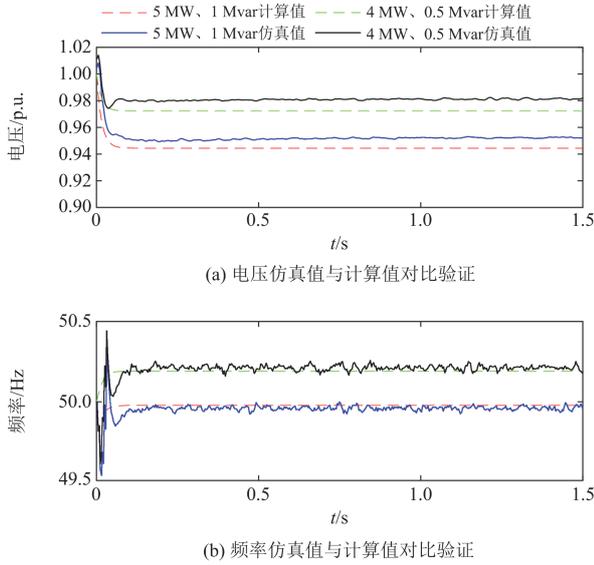


图 4 孤岛系统频率、电压幅值计算值与仿真值对比波形  
Fig. 4 Comparison of frequency and voltage amplitude of island system and the simulated values

过/欠频、过/欠压的孤岛检测方案作为常见的被动式孤岛检测方案具有不影响电能质量的优点, 但同时具有较大的检测盲区(non-detection zones, NDZ)。主动孤岛检测方案一般情况下都会影响系统的电能质量, 但是具有检测盲区小的优点。一般情况其检测盲区分别为  $[49.5, 50.5]$  Hz、 $[0.85U_N, 1.1U_N]$ 。由图 4 可见在本地负荷的有功功率和无功功率分别为 5 MW, 1 Mvar 和 4 MW, 0.5 Mvar 形成孤岛时, 基于过/欠频、过/欠压的检测方法无法准确检测出孤岛。

因此基于过/欠频检测方法应用在 VSG 控制和 PQ 控制逆变器共同并网形成孤岛时, 由于 VSG 具有下垂特性, 可以通过调节输出功率进而调节系统频率和电压幅值, 因此在这种情况下, 在 VSG 控制策略当中过/欠频的检测方法适应性较差。

### 3 VSG 角频率误差负反馈控制和电压相位变化率计算方法

#### 3.1 $dq$ 坐标系下电压相位变化率求解方法

电网三相电压可以表示为

$$\begin{cases} U_a = U \cos(\omega t + \varphi) \\ U_b = U \cos(\omega t + \varphi - 120^\circ) \\ U_c = U \cos(\omega t + \varphi + 120^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\varphi$  为电压的初相位。

当用锁相环(phase-locked loop, PLL)对电压进行锁相时<sup>[22-23]</sup>, 锁相环输出的电压相位  $\theta_{PLL}$  可用式(9)表示。因此当利用  $\theta_{PLL}$  进行  $dq$  变换时, 电压  $U$  始终与  $d$  轴重合(即  $u_d = 1$  p.u.、 $u_q = 0$  p.u.), 因此利用  $\arctan(-u_q / u_d)$  计算的相位始终为  $0^\circ$ 。

$$\theta_{PLL} = \int \omega dt + \varphi \quad (9)$$

因此构造如图 5 所示的  $dq$  坐标系,  $d$  轴初始位置与  $ABC$  坐标系的  $A$  轴重合, 且  $dq$  坐标系始终以额定角频率  $\omega_n$  旋转,  $U$  表示电压。此时反正切可以表示为

$$\theta = \arctan\left(-\frac{u_q}{u_d}\right) = \int (\omega - \omega_n) dt + \varphi \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 当电压频率未发生改变时, 即  $\omega = \omega_n$  时,  $\theta = \varphi$ ; 当频率发生变化时,  $\theta$  会积累频率的差值, 改变  $U$  与  $d$  轴的相对位置, 如图 5 所示。在图 5 中, 在  $t = 0$  s 时刻将  $dq$  坐标系的  $d$  轴与  $ABC$  坐标系的  $A$  轴重合, 即  $d$  轴的初相位为  $0^\circ$ , 此时电压与  $d$  轴的夹角  $\theta$  为电压的初相位  $\varphi$ 。利用 Park 变换将电压  $U$  变换到该  $dq$  坐标系下, 如式(11)所示。

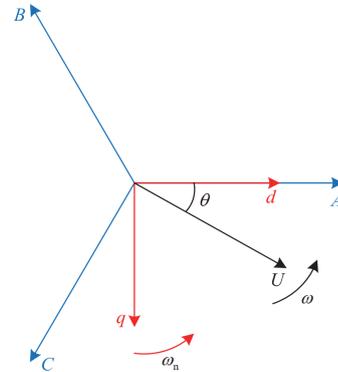


图 5 所构造的  $dq$  坐标系  
Fig. 5 The constructed  $dq$  coordinate system

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega_n t) & \cos(\omega_n t - 120^\circ) & \cos(\omega_n t + 120^\circ) \\ \sin(\omega_n t) & \sin(\omega_n t - 120^\circ) & \sin(\omega_n t + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi) \\ \cos(\omega t + \varphi - 120^\circ) \\ \cos(\omega t + \varphi + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (11)$$

由式(10)可以看出当  $\omega = \omega_n$  时,  $\theta = \varphi$ 。当  $\omega \neq \omega_n$  时, 根据式(10)可以看出  $\theta$  会发生变化, 且  $\omega$  和  $\omega_n$  的差值越大, 则  $\theta$  就会变化越快。由于是对  $\omega$  和  $\omega_n$  的差值进行积分, 因此理论上只要角频率  $\omega$  偏离  $\omega_n$ , 就会导致  $\theta$  的变化。因此可以利用  $\theta$  的变化量  $\Delta\theta$  来检测孤岛的发生,  $\Delta\theta$  可用式(12)计算。

$$\Delta\theta = \frac{\theta_N - \theta_{(N-1)}}{\Delta t} \quad (12)$$

式中:  $\theta_N$ 、 $\theta_{(N-1)}$  分别表示第  $N$  个周期和第  $N-1$  个周期的  $\theta$  值;  $\Delta t$  为一个周期的时间, 即 0.02 s。

### 3.2 VSG 角频率误差负反馈控制

由于 VSG 控制策略具有构网能力, 可以对电网电压幅值和电压频率进行调节, 因此当电网电压频率轻微偏移额定值时, VSG 会根据有功-频率下垂关系对电网频率进行调整<sup>[24-27]</sup>。因此, 在功率匹配度较高的情况下形成孤岛, 会因为频率波动较小, 而无法准确检测出孤岛。因此将角频率误差反馈至有功环, 通过反馈的误差加大孤岛下的频率波动, 以达到在负荷匹配度较高的情况下检测出孤岛, 同时可以加快孤岛检测的速度。

图 6 为 VSG 角频率误差负反馈控制框图, 其中红色虚线框为角频率反馈模块。当系统稳定运行时, 有功环计算得到的角频率  $\omega_p = \omega_n$ , 因此角频率误差反馈值为 0。当系统发生变化时  $\omega_p \neq \omega_n$ , 此时角频率误差反馈不为零, 该反馈会增大频率的变化。当频率持续变化时, 角频率反馈叠加到有功环会加速频率的变化。而当频率只是暂时波动时, 角频率反馈会暂时性增大角频率变化, 但是波动消失后, 角频率反馈变为 0。

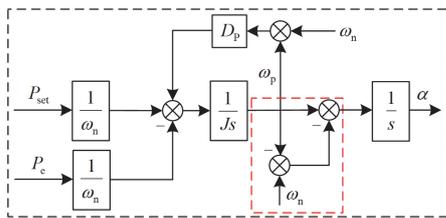


图 6 VSG 角频率误差负反馈控制框图

Fig. 6 Block diagram of VSG angular frequency error negative feedback control

为避免系统频率扰动造成频率波动对孤岛检测造成影响, 应设置一定的阈值。并网情况下负荷投切虽然会造成系统的频率扰动导致式(8)计算的相位  $\theta$  发生变化, 但是频率很快恢复至额定频率, 相位  $\theta$  不会持续发生变化, 因此设置一定的检测时间窗就可避免负荷投切造成误检测的情况。图 7 为

孤岛检测流程图, 当  $\Delta\theta > \Delta\theta_{th}$  且持续时间  $\Delta t > \Delta t_{th}$  时, 检测为孤岛。其中相位变化率阈值  $\Delta\theta_{th}$  设为 20°/s, 时间阈值  $\Delta t_{th}$  为 0.02 s。

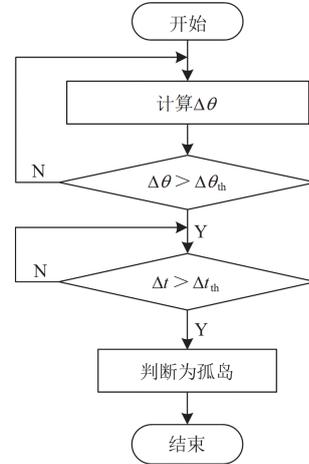


图 7 孤岛检测流程

Fig. 7 Island detection process

## 4 仿真验证

搭建如图 1 所示拓扑结构进行仿真验证, 具体参数如表 1、表 2 所示。表 1 中 DG1 表示跟网 PQ 控制 DG, 表 2 中 DG2 表示构网 VSG 控制策略。2.5 s 开关 K 断开, DG1、DG2 和本地负荷共同构成孤岛。

表 1 DG1 参数

Table 1 Parameters of DG1

参数名称	数值	参数名称	数值
额定容/MW	2	直流电压/kV	1.45
功率因数	1	并网电压/kV	0.69
$L_f$ /H	0.000 035	电网电压/kV	10
$C_f$ /F	0.0018	$L_g$ /H	0.000 025

表 2 DG2 参数

Table 2 Parameters of DG2

参数名称	数值	参数名称	数值
额定容/MW	2	直流电压/kV	1.45
功率因数	1	并网电压/kV	0.69
$L_f$ /H	0.000 035	电网电压/kV	10
$C_f$ /F	0.0018	$L_g$ /H	0.000 025
$J$	2	$D_Q$	21.292
$D_p$	1013.22	$K$	0.338

如图 8 所示, 2.5 s 形成孤岛时, 本地负荷额定有功功率 4.1 MW, 与 DG1 和 DG2 的额定功率总和仅差 2.5%, 此时功率匹配度较高。孤岛前 DG1 和 DG2 均按额定容量进行输出, 且为单位功率因数运

行。正常运行时系统与该部分功率交换较少,即  $\Delta P = 0.1 \text{ MW}$  和  $\Delta Q = 0 \text{ Mvar}$ 。因此孤岛后 DG1 输出的有功功率和无功率均没有发生变化,保持为设定值。DG2 输出的有功功率略微增大,无功功率保持为设定值  $0 \text{ Mvar}$ 。由图 8(c)可见  $\Delta\theta_1$  和  $\Delta\theta_2$  均大于  $\Delta\theta_{th}$  且持续时间均超过  $0.02 \text{ s}$ 。图 8(d)为孤岛检测信号,高电平表示检测出孤岛状态,可见 DG1 和 DG2 可分别在  $0.026 \text{ s}$  和  $0.027 \text{ s}$  检测出孤岛。由图 8(e)可见此种情况下基于过/欠频无法检测出孤岛。

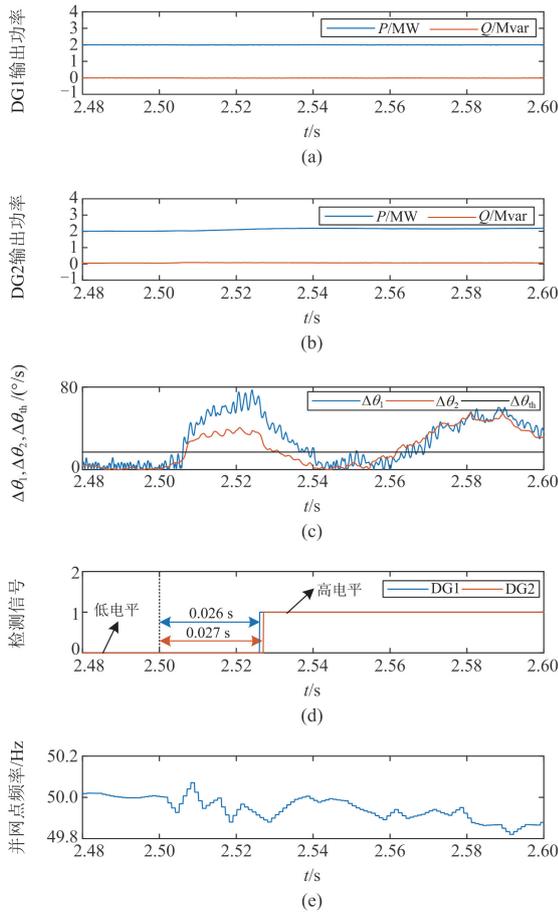


图 8 孤岛时负荷有功 4.1 MW、无功 0 Mvar  
Fig. 8 Island load active power is 4.1 MW and reactive power is 0 Mvar

图 9 为频率变化率(rate-of-change-of-frequency, ROCOF)在此场景下的仿真图,ROCOF 门槛值一般设为  $1 \text{ Hz/s}$  或  $1.2 \text{ Hz/s}$ <sup>[28]</sup>,本文选  $1 \text{ Hz/s}$ 。由图 9 可见,此时 ROCOF 无法准确检测出孤岛。

图 10 所示,  $2.5 \text{ s}$  形成孤岛时本地负载额定有功  $5 \text{ MW}$ 、额定无功  $1 \text{ Mvar}$ 。孤岛前 DG1 和 DG2 均按额定容量进行输出,且为单位功率因数。 $2.5 \text{ s}$  发生孤岛时,由于本地负荷有功、无功均大于 DG 的功率设定值,因此这部分功率缺额由 VSG 进行补偿。

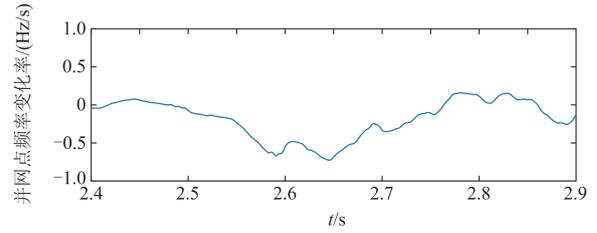


图 9 孤岛时负荷有功 4.1 MW、无功 0 Mvar 的频率变化率仿真图

Fig. 9 Simulation result of ROCOF when island load active power is 4.1 MW and reactive power is 0 Mvar

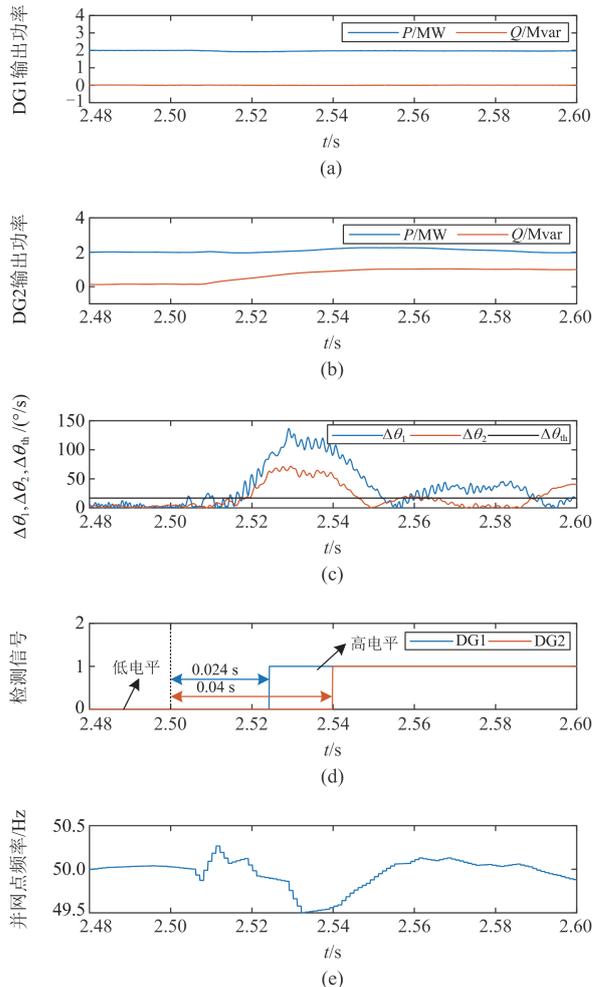


图 10 孤岛时负荷有功 5 MW、无功 1 Mvar  
Fig. 10 Island load active power is 5 MW, reactive power is 1 Mvar

根据 VSG 的无功下垂特性,当输出无功大于设定值时,VSG 会降低端口电压,因此负荷消耗的有功功率会小于  $5 \text{ MW}$ 。由图 10(b)可见此时 VSG 无功增发  $1 \text{ Mvar}$ 。图 10(c)中  $\Delta\theta_1$  和  $\Delta\theta_2$  均大于  $\Delta\theta_{th}$  且持续时间均超过  $0.02 \text{ s}$ ,由图 10(d)可见 DG1 和 DG2 可

分别在 0.024 s 和 0.04 s 检测出孤岛。由于 VSG 的有功环具有频率下垂特性, 会通过输出功率调节其端口的频率, 因此 DG2 检测时间比 DG1 长。由图 10(e)可见此种情况下基于过/欠频无法检测出孤岛。

图 11 所示为有功负荷 5 MW、无功负荷 1 Mvar 孤岛时的 ROCOF 仿真图。由图可知此时 ROCOF 的最大值为 1.047 Hz/s, 虽然可以检测出孤岛, 但是测量值落在动作边界上, 灵敏性较差。

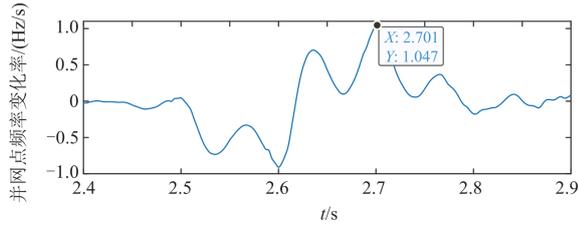


图 11 孤岛时负荷有功 5 MW、无功 1 Mvar 的频率变化率仿真图

Fig. 11 Simulation result of ROCOF when island load active power is 5 MW and reactive power is 1 Mvar

图 12 所示为本地负载额定有功功率 2 MW, 额定无功功率 0.6 Mvar 在 2.5 s 形成孤岛时的仿真波形。此时有功功率完全由 DG1 提供, DG2 根据有

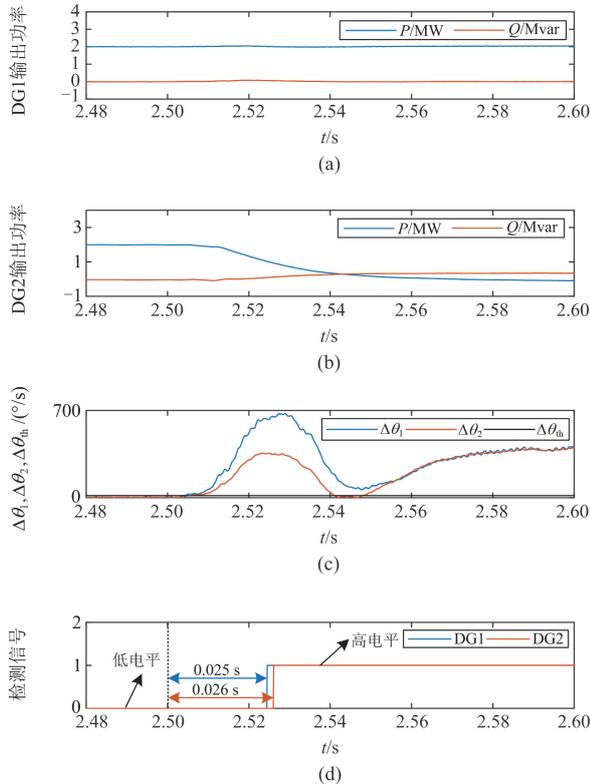


图 12 孤岛时负荷有功 2 MW、无功 0.6 Mvar

Fig. 12 Island load active power is 2 MW and reactive power is 0.6 Mvar

功-下垂、无功-下垂关系在孤岛期间不输出有功功率, 仅输出无功功率满足负荷要求, 如图 12(a)和图 12(b)所示。由图 12(c)可知, 此时  $\Delta\theta_1$  和  $\Delta\theta_2$  的幅值大于门限值  $\Delta\theta_{th}$  很多, 具有较高的检测可靠性。由图 12(d)可知, 此时 DG1 和 DG2 在 0.025 s 和 0.026 s 内可以可靠检测出孤岛。

图 13 所示为本地负载额定有功功率 0 MW, 额定无功功率 0 Mvar 在 2.5 s 形成孤岛时的仿真波形。由于 DG1 基于 PQ 控制, 因此在此期间保持功率设定值输出功率, DG2 的 VSG 控制根据下垂关系调节孤岛的功率将盈余功率全部吸收, 如图 13(a)和图 13(b)所示。由图 13(c)所示, 此时  $\Delta\theta_1$  和  $\Delta\theta_2$  的幅值比门限值  $\Delta\theta_{th}$  大很多, 因此具有较高的检测可靠性。

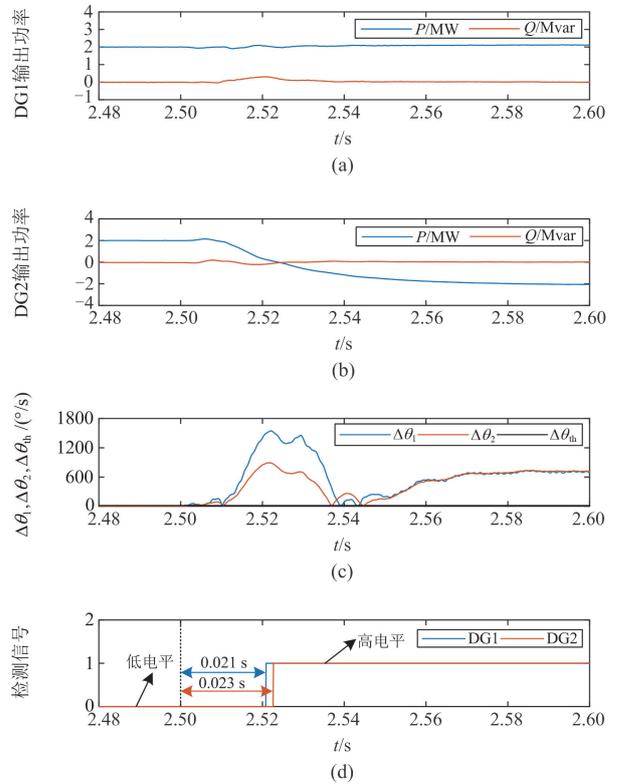


图 13 孤岛时负荷有功 0 MW、无功 0 Mvar

Fig. 13 Island load active power is 0 MW and reactive power is 0 Mvar

## 5 结论

本文针对过/欠频孤岛检测方法, 应用于含构网逆变器跟网逆变器的孤岛时, 具有检测盲区较大的问题, 提出了基于 VSG 角频率误差负反馈的电压相位变化率孤岛检测方法, 利用  $dq$  坐标系下的电压相位变化率进行孤岛检测。同时在 VSG 控制的有功环中加入角频率误差负反馈, 增大孤岛时频率扰动

对电压相位的影响,可以加快孤岛检测速度。仿真结果证明了所提方案的有效性。

### 参考文献

- [1] ELWAKIL M, ZOGHABY H, SHARAF S, et al. Adaptive virtual synchronous generator control using optimized bang-bang for islanded microgrid stability improvement[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 4(8): 1-21.
- [2] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2359. ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2359.
- [3] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165-175. ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [4] 周杨, 张俊勃. 适用于孤岛微电网的电压型虚拟同步发电机自适应惯性控制与频率恢复控制[J]. 南方电网技术, 2022, 16(1): 127-136. ZHOU Yang, ZHANG Junbo. Adaptive inertia control and frequency recovery control of voltage-controlled virtual synchronous generators for an isolated microgrid[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1): 127-136.
- [5] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 451-458.
- [6] 侯磊, 马涛, 蔡毅, 等. 孤岛型多能互补系统的规划与运行优化模型研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 108-116. HOU Lei, MA Tao, CAI Yi, et al. Research on optimization of planning and operation for islanded integrated energy system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 108-116.
- [7] 赵炳洋, 赵波, 胡娟, 等. 考虑 VSG 构网储能暂态与稳态优化的自适应策略[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 39-47. ZHAO Bingyang, ZHAO Bo, HU Juan, et al. Adaptive strategy considering transient and steady-state optimization of VSG grid-forming energy storage[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 39-47.
- [8] 刘思佳, 庄圣贤, 谢茂军. 基于调制比定向偏移控制的孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 132-139. LIU Sijia, ZHUANG Shengxian, XIE Maojun. Islanding detection method based on modulation index directional shift control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 132-139.
- [9] 徐华电, 苏建徽, 刘宁, 等. 虚拟同步机场景下 OUF 与 OUV 检测盲区分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20): 5965-5974. XU Huadian, SU Jianhui, LIU Ning, et al. Non-detection zone analysis of over/under frequency and over/under voltage islanding detection with virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 5965-5974.
- [10] 蔡颖凯, 张冶, 康乃荻, 等. 基于动态一致性算法的 VSG 微网孤岛二次控制[J]. 电力电子技术, 2023, 57(5): 93-97. CAI Yingkai, ZHANG Ye, KANG Naidi, et al. Secondary control strategy of micro-grid island with VSG based on dynamic consistency algorithm[J]. Power Electronics, 2023, 57(5): 93-97.
- [11] 王晓寰, 张旭东, 郭红强. 基于相位簇扰动的下垂控制并网逆变器孤岛检测[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1728-1738. WANG Xiaohuan, ZHANG Xudong, GUO Hongqiang. Islanding detection of droop-controlled grid-connected inverters on phase cluster disturbance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1728-1738.
- [12] 贺超, 王冕, 陈国柱. 基于下垂控制的孤岛检测方法及其改进策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 87-92. HE Chao, WANG Mian, CHEN Guozhu. Islanding detection based on droop control and its improvement strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 87-92.
- [13] 陈巧地, 张兴, 李明, 等. 基于阻抗辨识的下垂控制并网逆变器孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 123-129. CHEN Qiaodi, ZHANG Xing, LI Ming, et al. Impedance identification based islanding detection method for grid-connected inverter with droop control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 123-129.
- [14] 吴宇奇, 马啸, 叶雨晴, 等. 适应多控制逆变器不同工况的混合式孤岛检测策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3887-3895. WU Yuqi, MA Xiao, YE Yuqing, et al. Hybrid islanding detection strategy suitable for different operating conditions of multi-control inverters[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3887-3895.
- [15] 王晓寰, 杨庆收, 阚志忠, 等. 下垂控制并网逆变器的孤岛检测机理研究[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(4): 15-23.

- WANG Xiaohuan, YANG Qingshou, KAN Zhizhong, et al. Research on islanding detection of grid-connected inverter system based on droop loop control[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2018, 37(4): 15-23.
- [16] 尹春杰, 王芳, 石磊, 等. 基于瞬时电压矢量定向的有源电力滤波器补偿电流检测[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(7): 112-118.
- YIN Chunjie, WANG Fang, SHI Lei, et al. Compensation current detection of active power filter based on instantaneous voltage vector orientation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(7): 112-118.
- [17] XIONG Xiaoling, WU Chao, BLAABJERG F. An improved synchronization stability method of virtual synchronous generators based on frequency feedforward on reactive power control loop[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(8): 9136-9148.
- [18] 高淑萍, 李文浩, 汪凯昌, 等. 基于谐波阻抗 $dq$ 分量的孤岛检测新方法[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(9): 2387-2392.
- GAO Shuping, LI Wenhao, WANG Kaichang, et al. A new method of islanding detection based on  $dq$  component of harmonic impedance[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2018, 39(9): 2387-2392.
- [19] 徐耀, 朱玲, 吕振宇, 等. 虚拟同步机孤岛并联系统暂态同步稳定性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(15): 1-11.
- XU Yao, ZHU Ling, LÜ Zhenyu, et al. Transient synchronization stability analysis of a virtual synchronous machine isolated island parallel system[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(15): 1-11.
- [20] 高长伟, 黄翀阳, 郑伟强, 等. 虚拟阻抗制动可再生能源机组低电压穿越控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(10): 142-152.
- GAO Changwei, HUANG Chongyang, ZHENG Weiqiang, et al. Low voltage ride-through control of a renewable energy unit with virtual impedance braking[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(10): 142-152.
- [21] 王自力, 陈燕东, 李雪萍, 等. 孤岛微电网多虚拟同步发电机频率无差协调控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(7): 12-23.
- WANG Zili, CHEN Yandong, LI Xueping, et al. Coordinated control strategy for frequency deviation-free regulation of multiple VSGs in island microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(7): 12-23.
- [22] 张兴, 张崇巍. PWM整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [23] 白雪岩, 樊艳芳, 刘雨佳, 等. 考虑可靠性及灵活性的风光储虚拟电厂分层容量配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(8): 11-24.
- BAI Xueyan, FAN Yanfang, LIU Yujia, et al. Wind power storage virtual power plant considering reliability and flexibility tiered capacity configuration[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(8): 11-24.
- [24] LUO Rui, GAO Houlei, PENG Fang, et al. An adaptive low-voltage ride-through method for virtual synchronous generators during asymmetrical grid faults[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2024, 15(3): 1589-1600.
- [25] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(16): 5179-5192.
- SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [26] 柴秀慧, 张纯江, 赵晓君, 等. 并网储能逆变器的混合型VSG控制策略研究[J]. *电力电子技术*, 2023, 57(11): 74-76, 97.
- CHAI Xiuhui, ZHANG Chunjiang, ZHAO Xiaojun, et al. Research on hybrid VSG control strategy of grid-connect energy storage inverter[J]. *Power Electronics*, 2023, 57(11): 74-76, 97.
- [27] 胡健雄, 程静, 王维庆, 等. 基于VSG的风光互补系统自适应功频控制策略[J]. *电力电子技术*, 2023, 57(6): 82-85.
- HU Jianxiong, CHENG Jing, WANG Weiqing, et al. A VSG-based adaptive power frequency control strategy for wind/solar complementary system[J]. *Power Electronics*, 2023, 57(6): 82-85.
- [28] ALAM M, BEGUM M, MUTTAQI M. Assessing the performance of ROCOF relay for anti-islanding protection of distributed generation under subcritical region of power imbalance[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(5): 5395-5405.

收稿日期: 2024-03-26; 修回日期: 2024-08-20

作者简介:

罗瑞(1995—), 男, 博士, 研究方向为新能源并网保护与控制; E-mail: 202220674@mail.sdu.edu.cn

高厚磊(1963—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: houlei@sdu.edu.cn

齐晓丽(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为分布式光储接入系统孤岛检测与离网控制。E-mail: 202234726@mail.sdu.edu.cn

(编辑 张颖)