

# 基于虚拟同步发电机的 微电网并网安全控制策略

郭亦宗, 郭创新\*

(浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

## Security Control Strategy of Micro-grid Between Grid-connected and Off-grid Based on Virtual Synchronous Generator

GUO Yizong, GUO Chuangxin\*

(Electrical Engineering College, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

**摘要:** 微电网作为综合能源系统的一大分支, 广泛用于分布式电源的就地消纳。而随着冷、热、气等逐渐引入, 对微电网安全控制的要求也越来越高。针对微电网的孤岛和并网建模及两运行状态之间的过渡过程进行分析, 提出了改进虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)模型下的控制策略。通过引入合适的虚拟阻抗, 有效模拟了同步电抗的特性, 保证孤岛运行基本稳定的同时, 使得并网至孤岛的切换在该模型下不需要添加额外的控制部分即可完成平滑过渡; 针对孤岛至并网的切换, 提出了改进型的预同步控制模型, 该模型能快速准确地跟踪电网电压幅值、频率以及相位。最后, 结合实际算例对所构造的模型在 Matlab/Simulink 环境下进行仿真, 验证了所提模型的正确性及其优势。

**关键词:** 微电网; 无缝切换; 虚拟同步发电机(VSG); 虚拟阻抗; 改进预同步控制

**ABSTRACT:** As a major branch of integrated energy system, micro-grid is widely used in the local consumption of distributed generation. With the introduction of cold, heat and gas, the requirement of micro-grid security control is becoming higher and higher. The grid-connected and off-grid mode of micro-grid and the transition process between two operating states were analyzed, furthermore, a control strategy based on improved virtual synchronous generator (VSG) model was proposed. By using appropriate virtual impedance, the characteristics of synchronous reactance were effectively simulated, which ensured the stability of off-grid operation and makes the transition from

grid-connected mode to off-grid mode smooth without adding additional control. An improved pre-synchronization control model was proposed for the switching from off-grid mode to grid-connected mode, which could accurately and quickly track the voltage amplitude, frequency and phase. Finally, the model was simulated in Matlab/Simulink environment with a practical example to verify the correctness and advantages of the proposed model.

**KEY WORDS:** micro-grid; seamless switch; virtual synchronous generator (VSG); virtual impedance; improved pre-synchronization control

## 0 引言

随着我国经济社会的迅速发展, 能源效益和环境效益被越来越多地作为考量工程价值的标准, 迫切需要优良的可再生清洁能源作为替代和补充以满足日益增长的电力需求。同时, 实现多能互补是能源互联网发展的基础与关键。

我国的分布式电源相关研究不仅仅是技术问题, 更是上升为国家战略。马丽梅等<sup>[1]</sup>构建了有效的可计算的一般均衡(computable general equilibrium, CGE)模型算法, 以研究中国的能源转型规划, 结果表明: 我国将经过3个阶段完成能源转型, 并在2035年进入能源转型的成熟期。基于此, 国内外许多学者针对如何更好地利用分布式电源展开了相关研究<sup>[2-8]</sup>。为更好地利用分布式电源的优势, 解决其不稳定、调度困难等问题, 研究人员提出了一种新的实现形式——微电网,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51877190)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51877190).

即在输电网、配电网的定义方式下,将电源、负荷、储能以及控制装置等模块结合起来而组成的小型电网。微电网相当于在大电网中独立出来的一个小型网络,能够解决分布式电源不可调度的问题,既可作为独立的单元孤岛运行,也可以与大电网互联,可控性和可靠性大大提高,能更好地整合资源<sup>[9]</sup>。

考虑因检修等计划性离网以及综合能源下电网的故障概率提高,势必会造成微电网与大电网的公共连接点(point of common coupling, PCC)开合次数增加。因此,保证孤岛和并网2种模式间的安全可靠切换、平滑过渡,制定出一套实用性、经济性好的微电网控制方案,具有巨大的经济和社会意义。

对于微电网并网,目前国内外较为成熟的研究依然是基于主从控制和对等控制2种模式。郑竞宏等<sup>[10]</sup>基于主从控制模式的切换方法,提出一种状态跟随控制器,减小了微电网并网及孤岛2种运行模式切换过程中的暂态振荡,但对于大负荷和多节点系统依然存在冲击电流和电压的畸变问题。王武<sup>[11]</sup>提出了改进主电源恒压频比的控制模式,可以有效抑制电源控制模式切换时出现的电流畸变和电压突降问题,但此切换策略占用大量处理器资源,经济性较差。文献[12-13]提出采用下垂控制来实现孤岛稳定以及并网和离网过程的平滑切换,引入非线性下垂曲线来及时调整功率差额,但没有考虑大量负荷频繁投切以及综合能源转化的安全稳定问题。岳同耿日等<sup>[14]</sup>提出采用主从控制与对等控制2种模式相结合的控制策略,虽然能够对2种模式的缺点进行改善,但正常运行时无法满足“即插即用”的需求。文献[15-19]提出了虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)模型,该模型能够在单一控制模式下实现并网运行和切换,但存在抵御负荷变动能力较差、预同步并网时间较长等问题。

基于上述研究现状,针对微电网并网存在的问题,本文提出了一种改进虚拟同步发电机模型,并在预同步控制部分改变控制对象进而提高预同步效率的安全控制策略。

## 1 改进虚拟同步发电机控制模型

### 1.1 虚拟同步发电机原理

在微电网并网控制过程中,控制对象实质上是光伏、风机、燃气轮机等电源连接电网的逆变器。类比传统电网的安全控制技术,电网的波动均是由同步发电机(synchronous generator, SG)的有功调频器和励磁调节器进行控制,因此,若能在逆变器的控制中模仿同步发电机的特性,引入相应参数实现大惯性、阻尼的要求,将会极大地提高系统切换过程的稳定性。虚拟同步发电机与同步发电机的并网对比如图1所示。

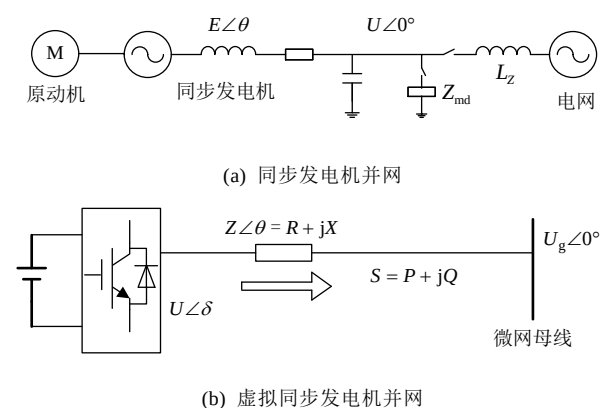


图1 虚拟同步发电机与同步发电机的并网对比

Fig. 1 Comparison of grid-connected between VSG and SG

可见,分布式电源或电热气耦合设备产生的电源相当于传统电网中的原动机;三相逆变桥在位置上与同步发电机相对应;LRC滤波器虽然位置和元件相对应,但是数值大小有较大差别。

综上,在微电网并网和离网的过渡过程中,通过改进VSG的控制策略,使得逆变器不需要切换控制模式,而完全由VSG自动进行频率和电压的调整,实现与传统大电网相似的调节能力,从而降低了切换过程中的暂态振荡,解决了占用大量处理器资源的问题。

### 1.2 VSG本体控制模型

同步发电机的惯性与阻尼特性都体现在转子运动方程。由于VSG无机械装置和铁心,所以在分析和建立针对VSG的虚拟转子运动方程时,可将铁耗 $P_{Fe}$ 和机械损耗 $P_{\Omega}$ 取为0,即认为输入功率全部转化为电磁功率,得到如下转子运动方程:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \quad (1)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (2)$$

式中： $J$ 为发电机转子转动惯量； $T_m$ 、 $T_e$ 分别为机械功率和电磁功率； $D$ 为转子阻尼系数； $\omega$ 、 $\omega_0$ 分别为转子实际角速度、额定角速度； $\delta$ 为发电机功角。在转子运动方程中，转动惯量 $J$ 与阻尼系数 $D$ 是2个重要的参数。在实际的同步发电机运行时，一部分动能被储存在转子中并以转动惯量的形式体现出来。

当负荷发生变化时， $T_m$ 与 $T_e$ 之间存在转矩差，尤其是在微电网的容量远小于大电网的情况下，很小的扰动就可能会造成较大的频率偏差。若 $J$ 的值很大，则 $d\omega/dt$ 会减小，即 $\omega$ 的变化率减小。由此可见，转动惯量 $J$ 主要影响频率变化的暂态过程<sup>[20]</sup>。

当系统进入稳态时， $d\omega/dt$ 为0，因而有 $\Delta T = \omega \Delta D$ ，可见 $D$ 主要影响频率的变化量。调大阻尼系数 $D$ 即可降低频率的变化量，在允许的标准范围内保持稳定的频率<sup>[21]</sup>。

### 1.3 有功频率和无功电压控制器

根据同步发电机一次调频与一次调压特性曲线，考虑到虚拟同步发电机控制的逆变器区别于同步发电机，没有调速器、励磁调节器等机械装置，也就不存在控制信号到机械装置响应的过渡时长及机电过程的延时，而完全由电信号对逆变器控制进行频率和电压的自主调节。因此，建立了频率和电压2个状态量的下垂控制模型：

$$\omega = \omega^* - (P_e - P_0) / k_p \quad (3)$$

$$Q_0 - Q = \Delta U / k_q \quad (4)$$

式中： $\omega^*$ 是电网侧额定角频率； $P_e$ 、 $P_0$ 分别是实际有功功率和有功功率参考值； $Q$ 、 $Q_0$ 分别是实际无功功率和无功功率参考值； $\Delta U$ 是电压参考值与电压实际值之差； $k_p$ 是有功频率调节系数，表征有功和频率变化量的关系； $k_q$ 是无功电压调节系数，表征无功和电压的关系。

### 1.4 自适应虚拟阻抗

引入VSG的最终目的是将逆变器侧等效为

能调节频率和电压的一端口。不仅要引入惯性和阻尼，还要将输出端电压、输出电流的关系方程与同步发电机相似，则可认为外特性拟合了同步发电机。因此，VSG在输出阻抗上需要有同步发电机同步电抗的性质。同步电抗影响端电压随负荷的波动以及短路电流，在微电网中逆变器的输出侧为LRC滤波器，仅靠这一滤波电抗不足以模拟同步电抗，因此必须在逆变器的控制中引入虚拟阻抗的概念，使逆变器表现出同步电抗的特性。

目前，学术界对虚拟阻抗的研究主要有直接虚拟阻抗法和间接虚拟阻抗法2种控制算法<sup>[22]</sup>。然而，现有的研究中并没有给出如何确定虚拟阻抗的大小<sup>[23]</sup>，并且对于不同的微电网类型无法自适应调节虚拟阻抗的值。因此，本文提出了一种适用于虚拟同步发电机并离网的自适应虚拟阻抗模型，将虚拟阻抗与电网频率、支路电流联合闭环控制，达到自适应效果。其表达式为

$$z_v = \frac{\omega_c s L_v I}{(s + \omega_c) I_N} \quad (5)$$

式中： $z_v$ 为虚拟阻抗； $L_v$ 为虚拟电抗； $\omega_c$ 为PCC点测得的角频率； $I$ 和 $I_N$ 分别为支路实际电流和额定电流。

## 2 并网转孤岛策略

本文主要研究非计划性离网时的切换控制策略，相较于计划性离网，非计划性离网是不可控、未知的，尤其是当配电网发生故障而必须切断与微电网的连接时，调度部门无法立即做出反应，只能由微电网内部进行自然过渡。因此，非计划性离网对微电网自我调整能力的要求较高。

在改进虚拟同步发电机控制策略模型下，当PCC突然断开时，VSG仍然保持着切换前的并网状态，与电网侧的电压幅值、相位和频率基本相同，因此不会造成很大的暂态冲击电流，可以自然地实现从并网到孤岛模式的切换。

但PCC断开后无法满足微网内负荷需求与供能的瞬时功率平衡，常常引起频率和电压的暂态稳定问题。此时可通过VSG及自适应虚拟阻抗不断修正逆变器输出的有功和无功，使感应电动势和功角达到新的平衡点，再次满足有功和无功

的平衡。VSG 算法可使电压和频率在短期内只有微小的波动,满足用户电能质量的要求。因此,在该控制策略下,不需要逆变器控制模式的切换,从根本上避免了切换过程的电压、电流畸变以及占用大量处理器资源等问题。

### 3 孤岛转并网策略

当微电网运行在孤岛模式时,需要自身能够保证电压和频率的稳定。然而,若仅仅是一次调节作用,则电压和频率会与电网电压出现偏差,在时间的积累作用下会变成相位的巨大偏差。此时若电网故障修复完毕,发出并网指令,微电网不能直接并网。本文通过改进传统的预同步控制策略,使得预同步时间控制对象直接对应 PCC 点电压的  $q$  轴分量。

本文作如下近似:孤岛运行的电压与电网电压幅值相差不大,认为两者相等。取  $a$  相进行分析,两者的电压表达式如下:

$$\begin{cases} u_{ga} = U_g \cos(\omega_g t + \theta_g) \\ u_a = U_m \cos(\omega_c t + \theta_c) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $u_{ga}$ 、 $u_a$  分别是电网电压和 PCC 点电压瞬时值;  $U_g$ 、 $U_m$  分别是电网电压和 PCC 点电压幅值;  $\omega_g$  是电网电压角频率;  $\theta_g$ 、 $\theta_c$  分别是电网电压和 PCC 点电压相位角。

由式(6)可得两电压相量差:

$$\Delta u = u_{ga} - u_a \approx -2U_m \sin\left(\frac{\omega_g + \omega_c}{2}t + \frac{\theta_g + \theta_c}{2}\right) \times \sin\left(\frac{\omega_g - \omega_c}{2}t + \frac{\theta_g - \theta_c}{2}\right) \quad (7)$$

由式(7)可以看出,在未同步的情况下开关两侧电压瞬时值的幅值是  $2U_m$ , 而开关电阻很小,易引发较大冲击。

本文针对传统预同步控制方法的缺点<sup>[24]</sup>,提出快速预同步的改进预同步控制模型。VSG 模型下 PCC 点电压对电网电压的追踪如图 2 所示。其中:  $\dot{U}_g$  表示电网侧电压相量;  $\dot{U}_c$  表示 PCC 点实测的电压相量,在  $d$ 、 $q$  轴上的分量分别为  $\dot{U}'_{cd}$ 、 $\dot{U}'_{cq}$ 。

以电网电压为基准进行派克变换,将电网三

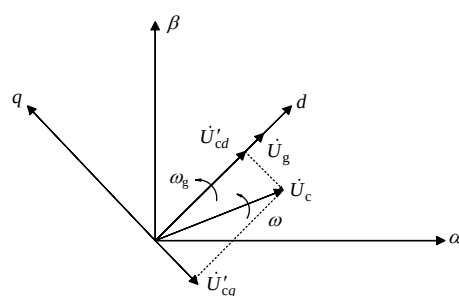


图2 PCC 点电压跟踪电网电压相量图

Fig. 2 Phase diagram of PCC voltage tracing grid voltage

相  $abc$  电压变换成  $dq$  旋转坐标系下的电压相量,由于电网电压三相对称,  $dq$  坐标系下的电网电压相量与  $d$  轴重合,无  $q$  轴分量,如图 2 中  $\dot{U}_g$  所示。因此,若要  $\dot{U}_c$  跟随  $\dot{U}_g$ ,使两者的相位角差为 0,则微电网侧电压在  $dq$  坐标系下也无  $q$  轴分量。

在仿真实验中,通过三相锁相环 (phase locked loop, PLL) 得到电网电压幅值、频率以及相位信息,参考角频率和参考电压都设置为电网角频率和电网电压幅值。启动改进的预同步环节后,通过闭环控制使得  $q$  轴分量趋于接近于 0 的一个阈值。

## 4 实际算例仿真

### 4.1 仿真参数

按照上述模型的控制方法,在 Matlab/Simulink 环境下搭建仿真模型,并对其仿真效果进行验证。仿真参数如表 1 所示。

表1 系统仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of system

| 参数                                  | 数值            |
|-------------------------------------|---------------|
| 直流电压/V                              | 800           |
| 电网线电压/V                             | $220\sqrt{3}$ |
| 开关频率/Hz                             | 1 350         |
| 滤波电容/ $\mu\text{F}$                 | 30            |
| 滤波电感/mH                             | 3.5           |
| 滤波电阻/ $\Omega$                      | 0.01          |
| 等效线路电阻/ $\Omega$                    | 0.892 9       |
| 等效线路电感/mH                           | 16.58         |
| 转动惯量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ) | 0.5           |
| 阻尼系数                                | 20            |
| 有功频率调节系数                            | 10 000        |
| 无功电压调节系数                            | 0.000 1       |

## 4.2 孤岛模式切负荷仿真

微电网在孤岛运行时应能够抵御因负荷的波

动而出现的功率不平衡。在 Simulink 中搭建切负荷仿真模型如图 3 所示。

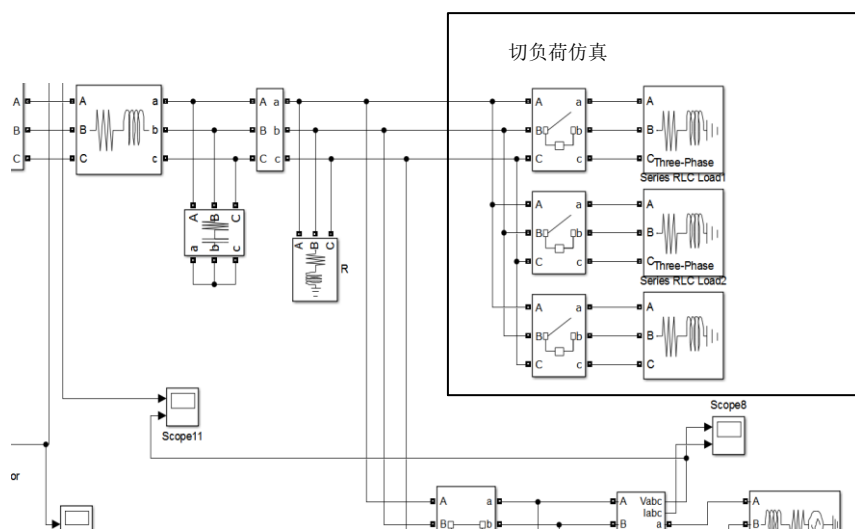


图 3 孤岛切负荷仿真模型

Fig. 3 Simulation model of load-shedding in off-grid state

在仿真模型设置中, Breaker 元件一直保持 Open 状态, 即为孤岛运行。设置仿真步长  $T_s=5\mu s$ , 算法为 Ode45, 开始时间为 0 s, 截止时间为 0.2 s。孤岛状态下恒定负载, 设置  $P=10\text{ kW}$ ,  $Q=1\text{ kV}\cdot\text{A}$ , 在切负荷的验证中, 设置切负荷时刻为 0.1 s, 切有功负荷  $\Delta P=1\text{ kW}$ 。图 4—6 为孤岛切负荷频率、电压和电流的变化曲线。

由图 4—6 可以看出, 在孤岛模式下切负荷频率波动在  $\pm 0.05\text{ Hz}$  之内, 最终在 0.1 s 附近稳定在 50 Hz 左右, 电压没有明显波动, 电流在 0.1 s 切负荷瞬间发生轻微波动并立即过渡到新的稳态值, 说明该模型在孤岛状态下能够很好地抵御负荷干扰。

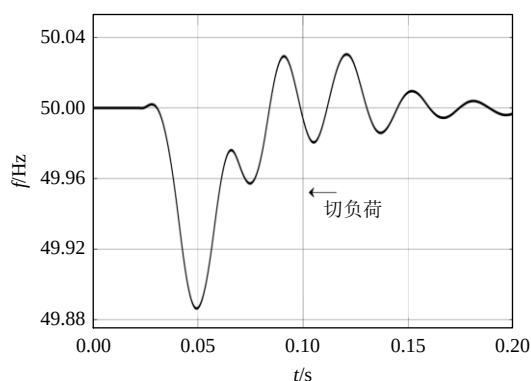


图 4 孤岛切负荷频率变化曲线

Fig. 4 Frequency curve of load-shedding in off-grid state

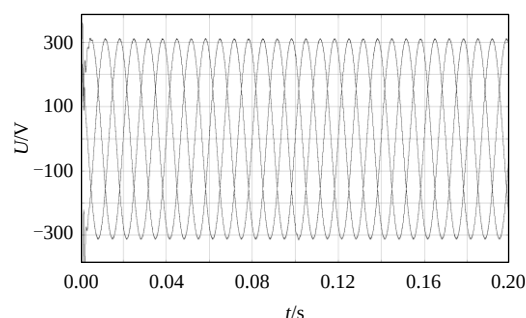


图 5 孤岛切负荷电压变化曲线

Fig. 5 Voltage curve of load-shedding in off-grid state

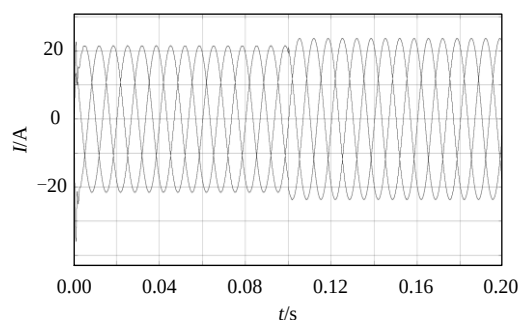


图 6 孤岛切负荷电流变化曲线

Fig. 6 Current curve of load-shedding in off-grid state

## 4.3 并网转孤岛模式仿真

由于在本文的 VSG 控制中, 并网转孤岛控制策略不需要额外的控制环节, 因此直接利用原有孤岛情况的仿真模型进行并网转孤岛验证即可。图 7 为并网转孤岛仿真模型。

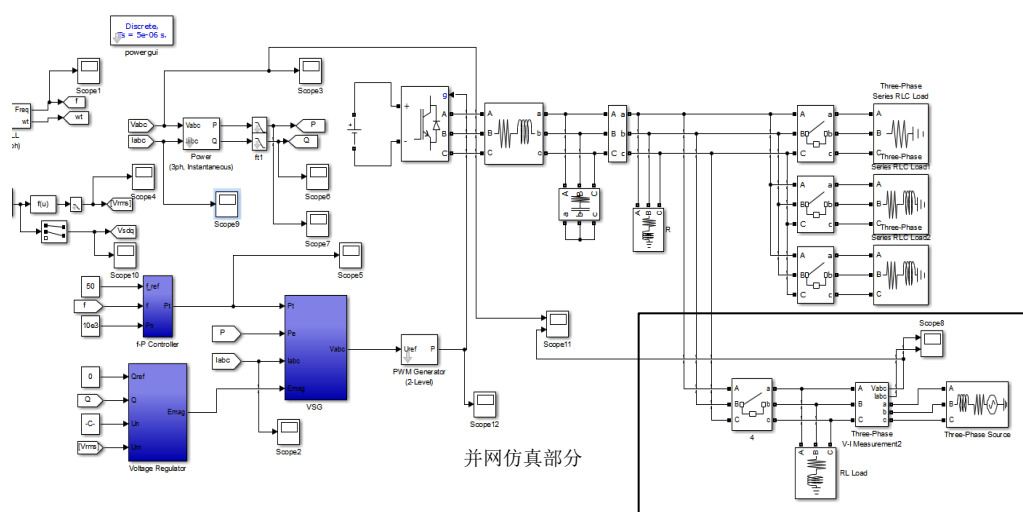


图 7 并网转孤岛仿真模型

Fig. 7 Simulation model of grid-connected to off-grid state

设置仿真时长为 0.4s, 断路器开断时刻为 0.2s。图 8、9 分别为并网转孤岛频率和联络线电压、电流在 0.1~0.4s 的变化曲线。由图 8、9 可以看出, 在从并网状态切换至孤岛状态的过程中, 频率变

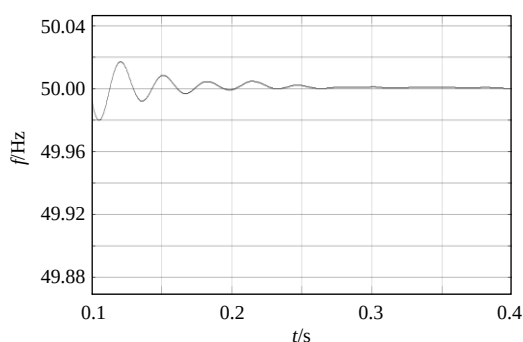


图 8 并网转孤岛频率变化曲线

Fig. 8 Frequency curve of grid-connected to off-grid state

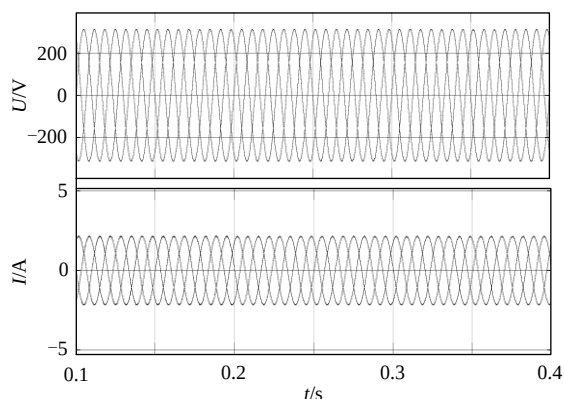


图 9 并网转孤岛联络线电压、电流变化曲线

Fig. 9 PCC voltage and current curves of grid-connected to off-grid state

化很小, 在 0.1s 的时间内平滑过渡到 50Hz 稳定值, 电压、电流不出现跳变。

#### 4.4 孤岛转并网模式仿真

在 VSG 模型下, 若故障后恢复, 孤岛微电网需要重新并网, 即发生孤岛向并网切换时不需要切换控制方式, 依旧保持 VSG 控制即可。然而, 为了避免并网过程中不出现巨大的冲击电流, 使其平滑过渡, 在发出合闸命令操作前需要进行预同步过程。在孤岛转并网的仿真中, 加入了改进的预同步子系统和切换开关子系统, 其仿真模型分别如图 10、11 所示。

在本文模型下, 主要根据  $U_q$  的变化来确定何时发出合闸信号。设定  $U_q$  的阈值为 2, 即控制  $U_q$  小于 2, 可认为此时 PCC 点电压  $U_c$  与电网电压  $U_g$  在工程误差范围内实现同步。设定仿真时间为 0.4s, 在 0.2s 发出并网信号, 开始预同步过程。图 12—14 分别为孤岛转并网频率, 联络线电压、电流, 以及  $U_q$  变化曲线。

由图 14 可以看出,  $U_q$  在 0.2s 时开始突变, 预同步过程开始, 但是由于模型中存在对  $U_q$  的闭环控制, 最终使  $U_q$  小于 2(阈值设为 2), 达到同步的条件才可并网。

并网后 PCC 点频率有所波动, 但最终经过约 0.15s 回到 50Hz 附近, 且频率波动范围不超过  $\pm 0.05$  Hz。PCC 点的电流被很好地限制, 没有出现冲击电流, 最终完成平滑过渡。

除此之外,所提出的改进虚拟阻抗以及改进预同步控制等模型,对于多种微电网情况有了更加统一的控制模式。通过仿真分析验证了所提出模型的可行性和有效性,能够为微电网及综合能

源系统的安全稳定控制提供理论指导。

## 参考文献

- [1] 马丽梅, 史丹, 裴庆冰. 中国能源低碳转型(2015—2050): 可再生能源发展与可行路径[J]. 中国人口资源与环境, 2018, 28(2): 8-18.  
MA L M, SHI D, PEI Q B. Low-carbon transformation of China's energy in 2015—2050: renewable energy development and feasible path[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(2): 8-18.
- [2] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32.  
CHEN W, AI X, WU T, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32.
- [3] 郭亦宗, 王楚通, 施云辉, 等. 区域综合能源系统电/热云储能综合优化配置[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1611-1621.  
GUO Y Z, WANG C T, SHI Y H, et al. Comprehensive optimization configuration of electric and thermal cloud energy storage in regional integrated energy system[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1611-1621.
- [4] 张国栋, 刘凯. 能源互联网背景下的微电网能量管理分析[J]. 发电技术, 2019, 40(1): 17-21.  
ZHANG G D, LIU K. Analysis of microgrid energy management under the background of energy internet[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(1): 17-21.
- [5] 孙亮, 张秀琦, 吕凌虹, 等. 含分布式电源的配电网电压控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(10): 1-5.  
SUN L, ZHANG X Q, LÜ L H, et al. Study on voltage control strategy for the distribution network with distributed generation[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(10): 1-5.
- [6] 郭亦宗, 冯斌, 岳铂雄, 等. 负荷聚合商模式下考虑需求响应的超短期负荷预测[J/OL]. 电力系统自动化: 1-16[2020-09-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200907.1321.004.html>.  
GUO Y Z, FENG B, YUE B X, et al. Ultra short-term load forecasting considering demand response in load aggregator mode[J/OL]. Automation of Electric Power System: 1-16[2020-09-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200907.1321.004.html>.
- [7] 谢林枫, 王红星, 刘军成, 等. 基于电能质量约束的智能配电网分布式电源消纳能力研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(4): 41-47.  
XIE L F, WANG H X, LIU J C, et al. A study on the distributed generation accommodation capacity of the smart distribution network based on power quality constraints[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4): 41-47.
- [8] 丁婧, 王欣, 郑淑文, 等. DG接入对微电网电流保护的影响[J]. 发电技术, 2019, 40(1): 22-27.  
DING J, WANG X, ZHENG S W, et al. The impact of DG access on microgrid current protection[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(1): 22-27.
- [9] 张宁, 周天睿, 段长刚, 等. 大规模风电场接入对电力系统调峰的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 152-158.  
ZHANG N, ZHOU T R, DUAN C G, et al. Impact of large-scale wind farm connecting with power grid on peak load regulation demand[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 152-158.
- [10] 郑竞宏, 王燕廷, 李兴旺, 等. 微电网平滑切换控制方法及策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 17-24.  
ZHENG J H, WANG Y T, LI X W, et al. Control methods and strategies of micro-grid smooth switchover[J]. Automation of Electric Power System, 2011, 35(18): 17-24.
- [11] 王武. 一种主从控制模式下微网主电源逆变器的控制策略[J]. 机电工程技术, 2017, 46(1): 55-58.  
WANG W. A control strategy for micro-grid master inverter based on master-slave configuration [J]. M&E Engineering Technology, 2017, 46(1): 55-58.
- [12] TAO R, JU R. An improved droop control strategy in islanded micro-grid[C]//Proceedings of the 2016 6th International Conference on Machinery, Materials, Environment, Biotechnology and Computer. 2016: 1488-1493.
- [13] 聂志强, 梁晖, 罗浩, 等. 基于非线性下垂控制的单模式微网并/离网无缝切换技术[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1371-1378.  
NIE Z Q, LIANG H, LUO H, et al. Single mode grid-connected/islanded microgrid seamless transition based on nonlinear droop control technology[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1371-1378.
- [14] 岳同耿日, 余向阳, 吕优, 等. 基于对等和主从综

- 合控制的微电网平滑切换控制方法研究[J]. 电气应用, 2019, 38(1): 78-84.
- YUE T G R, YU X Y, LÜ Y, et al. Research on smooth switching control method of microgrid based on peer-to-peer and master-slave integrated control[J]. Electrotechnical Application, 2019, 38(1): 78-84.
- [15] 赵建荣, 杨欣然, 王林, 等. 基于虚拟同步机的微电网并网无缝切换策略[J]. 电力电子技术, 2018, 52(10): 5-8.
- ZHAO J R, YANG X R, WANG L, et al. Seamless transfer strategy of micro-grid between grid-connected and of grid based on virtual synchronous generator[J]. Power Electronics, 2018, 52(10): 5-8.
- [16] 胡平, 任俊道. 光伏并网逆变器的虚拟同步发电机控制策略[J]. 自动化与仪表, 2019, 34(7): 22-25.
- HU P, REN J D. Virtual synchronous generator control strategy for grid-connected inverters[J]. Automation & Instrumentation, 2019, 34(7): 22-25.
- [17] 柴伦, 李岚, 李冰, 等. 基于改进虚拟同步发电机的预同步并网策略[J]. 可再生能源, 2019, 37(7): 1015-1020.
- CHAI L, LI L, LI B, et al. Strategy of pre-synchronized grid-connection based on improving virtual synchronous generator[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(7): 1015-1020.
- [18] 王鑫琪, 黄陈蓉, 张建德, 等. 基于虚拟同步发电机的微网逆变器控制策略分析[J]. 电工技术, 2019(12): 45-47.
- WANG X Q, HUANG C R, ZHANG J D, et al. Analysis of control strategy of microgrid inverter based on virtual synchronous generator[J]. Electric Engineering, 2019(12): 45-47.
- [19] 胡实, 袁旭峰, 朱余林, 等. 微网运行模式无缝切换控制技术研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(17): 56-61.
- HU S, YUAN X F, ZHU Y L, et al. Research on seamless switching control technology of micro-grid operation mode[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2018, 55(17): 56-61.
- [20] 宋琼, 张辉. 转动惯量对虚拟同步发电机输出特性的影响分析[J]. 电力电子技术, 2018, 52(9): 28-30.
- SONG Q, ZHANG H. The impact of inertia on characteristics of virtual synchronous generator[J]. Power Electronics, 2018, 52(9): 28-30.
- [21] 杨赟, 梅飞, 张宸宇, 等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 125-131.
- YANG Y, MEI F, ZHANG C Y, et al. Cooperative adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131.
- [22] 孙运志, 张成相, 蒋德玉, 等. 基于虚拟阻抗的微电网功率控制研究[J]. 信息技术, 2019, 43(7): 133-136.
- SUN Y Z, ZHANG C X, JIANG D Y, et al. Study of the microgrid power control based on virtual impedance control[J]. Information Technology, 2019, 43(7): 133-136.
- [23] 李维波, 徐聪, 许智豪, 等. 基于自适应虚拟阻抗的船用逆变器并联策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2538-2544.
- LI W B, XU C, XU Z H, et al. Inverter parallel control strategy based on variable virtual impedance[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2538-2544.
- [24] 杨亮, 王聪, 吕志鹏, 等. 基于同步逆变器的预同步并网方式[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3103-3108.
- YANG L, WANG C, LÜ Z P, et al. The method of pre-synchronized grid-connection of synchronverter[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3103-3108.

收稿日期: 2020-09-10。

作者简介:



郭亦宗

郭亦宗(1997), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源安全控制、需求侧管理, guoyizong@zju.edu.cn;



郭创新

郭创新(1969), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能电网风险调度、综合能源系统等, 本文通信作者, guochuangxin@zju.edu.cn。

(责任编辑 尚彩娟)